



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD AZCAPOTZALCO

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

**ESTUDIO DEL DESEMPEÑO DE TRES ALGORITMOS
DE CONTROL PARA SISTEMAS ACTIVOS Y SEMI-
ACTIVOS EN MARCOS PLANOS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

ES PRESENTADA POR:

ING. LUIS ERNESTO DE LA CERDA RESENDIZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. MANUEL E. RUIZ SANDOVAL HERNÁNDEZ

MÉXICO D.F., OCTUBRE DE 2017

*Dedicado a mis abuelos que desde el cielo
son mi inspiración para continuar esforzándome
en mi vida personal y profesional*

Agradecimientos

Agradezco primeramente a mis padres por sus consejos y enseñanzas para dirigirme hasta ahora por el camino correcto. Porque me han motivado y apoyado a continuar con mis estudios hasta llegar a este grado de maestría.

A mis hermanas por el ejemplo de fortaleza que siempre veo en ellas.

A mi director de tesis el Dr. Manuel Ruiz Sandoval Hernández por el asesoramiento técnico y científico para realizar este trabajo. Además del apoyo personal que me ha brindado durante estos últimos años.

A la Dra. Irma I. Siller Alcalá, al Dr. Hans I. Archundia Aranda y al Dr. Edgar Tapia Hernández por su valiosa colaboración en la revisión de esta tesis

A la Universidad Autónoma Metropolitana y al grupo de profesores del posgrado, por contribuir en mi formación como profesional de alta especialidad

Finalmente agradezco al CONACYT por la beca otorgada durante el tiempo de mis estudios de maestría.

Resumen

En el primer capítulo de este trabajo se incluyen antecedentes teóricos de la importancia del control estructural. Se explican todos los tipos de control y algunos ejemplos de los dispositivos que existen para cada uno de ellos. Además, se define el proceso del control activo y del semi-activo, en donde toman importancia los algoritmos de control y surgen los objetivos del trabajo.

Después de conocer los objetivos de investigación, en el capítulo 2 se resume la información encontrada de trabajos previos en los que se estudiarán los algoritmos de control en estudio. Dentro de este trabajo se estudiaron varios autores que han trabajado con sistemas de control activo o semi-activo y describen brevemente los algoritmos que utilizaron. Otros autores también compararon distintos algoritmos y su comportamiento en sistemas estructurales.

En el capítulo 3 primero se describe como son los modelos de sistemas estructurales en un espacio de estados. También, se realizó la investigación a detalle del funcionamiento de los algoritmos de control en cualquier sistema. Para después comprender como se aplica cada algoritmo cuando se trata de estructuras con sistemas de control activo o semi-activo. Al finalizar el capítulo 3, se describe como es la lógica de programación para diferenciar un sistema de control activo de uno semi-activo.

Dentro del capítulo 4 se describen las estructuras del proyecto SAC que se decidieron estudiar para aplicar los sistemas de control. Se seleccionaron 3 estructuras catalogadas como de media, baja y gran altura o de rígidas a flexibles. Después, se describen todas las consideraciones que se hicieron para modelar cada una de ellas.

En el capítulo 5 se describen los parámetros seleccionados para estudiar el comportamiento de los diferentes algoritmos en cada estructura. Para esto se buscaron registros sísmicos históricos de gran relevancia alrededor del mundo. Como método de evaluación de los sistemas estructurales controlados, se calcularon distintos parámetros de la respuesta estructural conocidos como índices de desempeño.

Los resultados de todos los análisis realizados se describen en el capítulo 6, en donde se encontró que si existe un distinto comportamiento para cada estructura con los tres algoritmos. Después, en el capítulo 7 se hace una propuesta de la metodología que se puede seguir para seleccionar un algoritmo adecuado. Para finalizar, en el capítulo 8 se concluye acerca de algunos detalles que se observaron durante el trabajo y también las dificultades que se llegaron a presentar.

Índice

Agradecimientos	II
Resumen	III
Índice	IV
Índice de Figuras	VI
Capítulo 1.- Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Control Estructural	3
1.2.1 Control Pasivo	3
1.2.2 Control Activo	5
1.2.3 Control Semi-Activo	7
1.2.4 Control Híbrido	9
1.3 Generalidades del Control Activo y Semi-Activo	9
1.4 Esquemas de Retroalimentación de Lazo Cerrado	9
1.5 Motivación	10
1.6 Objetivo General	10
1.6.1 Objetivos Específicos	11
Capítulo 2.- Estado del Arte	12
Capítulo 3.- Algoritmos de Control	19
3.1 Generalidades	19
3.2 Algoritmo Regulador Cuadrático Lineal (LQR)	20
3.3 Algoritmo Regulador Gaussiano Cuadrático Lineal (LQG)	21
3.4 Algoritmo Proporcional, Integral y Derivado (PID)	23
3.5 Control Activo o Semi-Activo en Cada Algoritmo	26
Capítulo 4.- Modelos en estudio	28
4.1 Edificio de Tres Niveles	28
4.2 Edificio de Nueve Niveles	29
4.3 Edificio de 20 Niveles	30
4.4 Consideraciones de Modelado	30
Capítulo 5.- Método de Evaluación	34
5.1 Registros Sísmicos utilizados	34
5.2 Índices de Desempeño	37
Capítulo 6.- Análisis de Resultados	40
6.1 Parámetros seleccionados para cada algoritmo	40

6.2 Resultados	42
6.2.1 Marco de Tres Niveles.	42
6.2.2 Marco de Nueve Niveles.	54
6.2.3 Marco de 20 Niveles.	67
6.2.4 Fuerza Requerida Acumulada en cada Edificio	78
Capítulo 7.- Metodología de Selección y Recomendaciones	85
Capítulo 8.- Conclusiones e Investigaciones Futuras.....	88
8.1 Conclusiones	88
8.2 Investigaciones Futuras	89
Capítulo 9.- Referencias.....	90
Apéndice A.- Resultados de todos los índices de desempeño.....	93
Apéndice B.- Gráficas de Resultados Para los Registros Escalados a 0.25 m/s.....	131

Índice de Figuras

Figura 1.1.- Anillo de Fuego del Pacífico (http://www.notimerica.com/sociedad/noticia-cinturon-fuego-pacifico-amenaza-sismica-iberoamerica-20160418163956.html).....	1
Figura 1.2.- Daños ocurridos en distintos terremotos a) El Centro, Mayo-1940, b) México, Sep-1985, c) Loma Prieta, Oct-1989, d) Northridge, Ene-1994, e) Kobe, Ene-1995, f) Chile, Feb-2010.....	2
Figura 1.3.- Escuela con aisladores de caucho en la base (Naeim y Kelly, 1999).....	3
Figura 1.4.- Amortiguador de Vibración Dinámica desarrollado por Frahm en 1909 (adap. Hartog, 1947)	4
Figura 1.5.- Edificios en los que se han ocupado Amortiguadores de Masa Resonante a) Centerpoint Tower b) Torre Taipei 101	4
Figura 1.6.- Esquema de un amortiguador de masa activo, AMD. (Datta, 2003).....	5
Figura 1.7.- Esquema del sistema de control activo Duox (Datta, 2003).....	6
Figura 1.8.- Esquema de un sistema de tendón activo (adap. Cheng, 2008).....	6
Figura 1.9.- Esquema de un sistema de contravientos activos (adap. Cheng, 2008).....	7
Figura 1.10.- Esquema de un dispositivo de rigidez controlable (Symans y Constantinou, 1999).....	7
Figura 1.11.- Esquema de un amortiguador de fluidos Controlables (Housner et al.,1997).	8
Figura 1.12.- Amortiguadores de Fricción controlable (Akbay y Aktan, 1995)	8
Figura 1.13.- Diagrama de la aplicación del control activo y del semi-activo.	9
Figura 1.14.- Esquema de un sistema de control por retroalimentación (Soong et al.,1991).....	10
Figura 2.1.- Esquemas de la estructura de 5 niveles con SHD (Kurata et al., 1999).....	12
Figura 2.2.- Instalación y modelado de un Amortiguador Hidráulico Semi-activo (SHD) (Kurata et al.,1999).....	13
Figura 2.3.- Composición del equipo de prueba (Kurata et al., 1999)	13
Figura 2.4.- Efecto de las ganancias de control y la amplitud del sismo de entrada (Kurata et al., 1999)	14
Figura 2.5.- Respuesta del sistema sujeto a un escalón unitario (Thenozhi y Yu, 2014).....	17
Figura 2.6.- Señales de control para a) PD, b) PID y c) SMC.....	18
Figura 3.1.- Esquema de lazo cerrado para el control Regulador Cuadrático Lineal (LQR)	21
Figura 3.2.- Esquema de lazo cerrado representando el regulador LQG (MathWorks, 1).....	22
Figura 3.3.- Esquema de lazo cerrado de un controlador LQG utilizado con el programa SimuLink	22
Figura 3.4.- Características de un controlador proporcional (Astrom y Hagglund 1995).....	23
Figura 3.6.- Respuesta en lazo cerrado de un sistema de segundo orden variando la ganancia del control proporcional.	24
Figura 3.7.- Respuesta en lazo cerrado de un sistema de segundo orden, con ganancia proporcional $K_p=1$ variando el tiempo de Integración.	24
Figura 3.8.- Interpretación de la acción derivativa como control predictivo, en donde la predicción es obtenida por una extrapolación lineal (Astrom y Hagglund, 1995).....	25
Figura 3.9.- Respuesta en lazo cerrado de un sistema de segundo orden, con ganancia proporcional $K_p=1$, tiempo de integración $T_i=10$, variando el tiempo de derivación.....	25
Figura 4.1.- Estructura en estudio de tres niveles (adap. Ohtori et al., 2004)	28
Figura 4.2.- Estructura en estudio de nueve niveles (adap. Ohtori et al., 2004).....	29
Figura 4.3.- Estructura en estudio de 20 niveles (adap. Ohtori et al., 2004)	31

Figura 4.4.- Distribución de masa a cada marco N-S.....	32
Figura 4.5.- Esquema de un sistema de contravientos activos (adap. Cheng, 2008).....	33
Figura 5.1.- Acelerogramas históricos escalados con velocidad máxima de 0.25 m/s.....	35
Figura 5.2.- Espectros de aceleración escalados con velocidad máxima de 0.25 m/s y $\xi=2\%$	35
Figura 5.3.- Espectros de velocidad escalados con velocidad máxima de 0.25 m/s y $\xi=2\%$	36
Figura 5.4.- Acelerogramas históricos escalados con velocidad máxima de 0.5 m/s.....	36
Figura 5.5.- Espectros de aceleración escalados con velocidad máxima de 0.5 m/s y $\xi=2\%$	37
Figura 5.6.- Espectros de velocidad escalados con velocidad máxima de 0.25 m/s y $\xi=2\%$	37
Figura 6.1.- Gráfica de J1 y J2 para el marco de tres niveles : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s.....	43
Figura 6.2.- Gráfica de J4 y J5 para el marco de tres niveles : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s.....	45
Figura 6.3.- Gráfica de J7 y J8 para el marco de tres niveles : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s.....	47
Figura 6.4.- Gráfica de J1 y J2 para el marco de tres niveles en control activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s.....	49
Figura 6.5.- Gráfica de J4 y J5 para el marco de tres niveles en control activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s.....	51
Figura 6.6.- Gráfica de J7 y J8 para el marco de tres niveles en control activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s.....	53
Figura 6.7.- Gráfica de J1 y J2 para el marco de nueve niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s.....	55
Figura 6.8.- Gráfica de J4 y J5 para el marco de nueve niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s.....	57
Figura 6.9.- Gráfica de J7 y J8 para el marco de nueve niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s.....	59
Figura 6.10.- Gráfica de J1 y J2 para el marco de nueve niveles en control activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s.....	61
Figura 6.11.- Gráfica de J4 y J5 para el marco de nueve niveles en control activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s.....	63
Figura 6.12.- Gráfica de J7 y J8 para el marco de nueve niveles en control activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s.....	65
Figura 6.13.- Gráfica de J1 y J2 para el marco de 20 niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s.....	67
Figura 6.14.- Gráfica de J4 y J5 para el marco de 20 niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s.....	69
Figura 6.15.- Gráfica de J7 y J8 para el marco de 20 niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s.....	71
Figura 6.16.- Gráfica de J1 y J2 para el marco de 20 niveles en control activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s.....	73
Figura 6.17.- Gráfica de J4 y J5 para el marco de 20 niveles en control activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s.....	75
Figura 6.18.- Gráfica de J7 y J8 para el marco de 20 niveles en control activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s.....	77

Figura 6.19.- Gráfica fuerza acumulada en los tres dispositivos del marco de tres niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s	79
Figura 6.20.- Gráfica fuerza acumulada en los tres dispositivos del marco de tres niveles en control activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s	80
Figura 6.21.- Gráfica fuerza acumulada en los nueve dispositivos del marco de nueve niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s.....	81
Figura 6.22.- Gráfica fuerza acumulada en los nueve dispositivos del marco de nueve niveles en control activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s	82
Figura 6.23.- Gráfica fuerza acumulada en los 20 dispositivos del marco de 20 niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s	83
Figura 6.24.- Gráfica fuerza acumulada en los 20 dispositivos del marco de 20 niveles en control activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s	84

Capítulo 1.- Introducción

1.1 Antecedentes

Desde hace varias décadas ha sido de gran importancia el estudio de distintos sistemas estructurales sujetos ante cargas dinámicas. Las cargas sísmicas han sido las acciones dinámicas de mayor interés en países como México, Chile, Japón, Estados Unidos, entre otros. *Los sismos más importantes desde el punto de vista de la ingeniería son de origen tectónico, es decir, los asociados con deformaciones a gran escala en la corteza de la tierra. La situación obedece a la frecuencia con que ocurren los sismos tectónicos, la energía que liberan y la extensión de las áreas que afectan.* (Rosenblueth y Newmark, 1978).

Es conocido que México es un país donde han ocurrido grandes desastres a consecuencia de sismos importantes. Una de las principales fuentes de sismos es la que se presenta en la costa del pacífico mexicano, donde la placa de Cocos y de Rivera interactúan con la placa Norteamericana y del Caribe mediante el fenómeno de subducción. Esta fosa pertenece a la franja conocida como el “Anillo de Fuego” (Figura 1.1) caracterizado por tener la mayor actividad sísmica del mundo debido a la interacción de las distintas placas tectónicas en el pacífico.

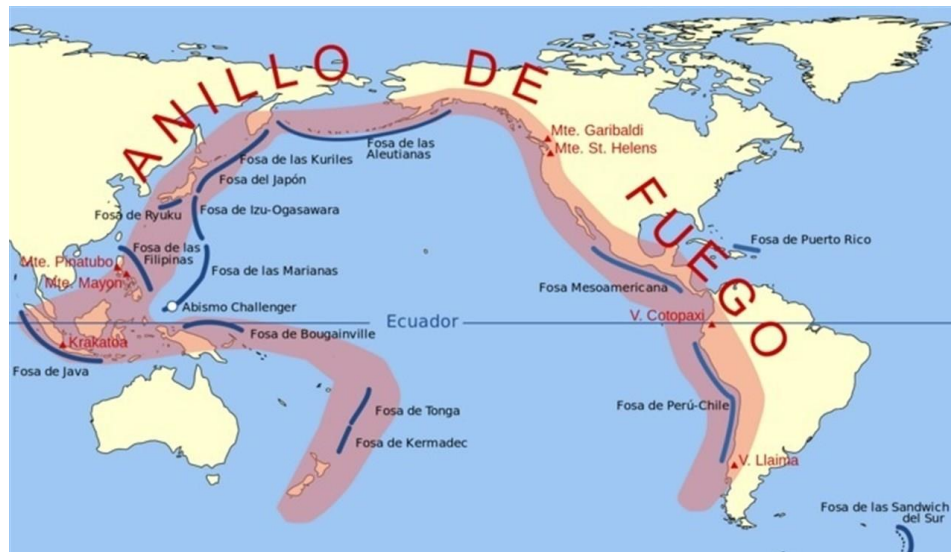


Figura 1.1.- Anillo de Fuego del Pacífico (<http://www.notimerica.com/sociedad/noticia-cinturon-fuego-pacifico-amenaza-sismica-iberoamerica-20160418163956.html>).

El ser humano a lo largo de su existencia ha tenido que construir edificaciones y obras civiles para satisfacer sus necesidades. Lamentablemente, muchas de estas construcciones han experimentado grandes sismos ocurridos en la historia (Figura 1.2). A pesar de los avances científicos y tecnológicos resulta imposible predecir la ocurrencia de un sismo, la cantidad de energía que se libera, el tipo de vibraciones que genera, etc. Es por eso que es necesario tener un diseño estructural adecuado de tal manera que el sistema cumpla con su función.

La historia del diseño estructural es posible dividirla en tres eras. La era clásica: se considera cuando sólo se tomaban en cuenta las cargas estáticas sobre la estructura. La era moderna: comienza a partir de que se toma en cuenta su respuesta dinámica. Actualmente las estructuras se diseñan para resistir cargas estáticas y dinámicas dentro de un intervalo aceptable. La era post-moderna del diseño estructural trata de anticipar y mitigar las cargas dinámicas. En algunos casos puede ser tan severa que la mejor forma de anteponerse a las solicitaciones puede ser con **métodos de control estructural** (Housner et al., 1997), descritos a continuación.



a) <http://scecdc.caltech.edu/significant/imperial1940.html>



b) <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=635866&page=161>



c) <https://www.ngdc.noaa.gov/hazardimages/event/show/14>



d) <http://caliearthquakes2.pbworks.com/w/page/12809945/1994%20Northridge>



e) http://macsstuff.net/p_hotobov/kobe-earthquake-destruction



f) <http://www.arqchile.cl/terremoto.htm>

Figura1.2.- Daños ocurridos en distintos terremotos a) El Centro, Mayo-1940, b) México, Sep-1985, c) Loma Prieta, Oct-1989, d) Northridge, Ene-1994, e) Kobe, Ene-1995, f) Chile, Feb-2010

1.2 Control Estructural

Con el fin de evitar grandes daños en las estructuras, *se han desarrollado continuamente nuevos dispositivos, técnicas y estrategias para que el sistema estructural reduzca la demanda sísmica, mejore la resistencia, la ductilidad o la capacidad de disipación de energía* (Rai, 2000).

Uno de los primeros investigadores en demostrar que era posible disipar la energía del movimiento sísmico en una estructura, fue John Milne. Él construyó una casa de madera sobre apoyos rodantes, lo que fue el inicio del aislamiento sísmico (Housner et al., 1997).

El principal objetivo de las investigaciones sobre el control estructural es limitar los efectos sísmicos o de viento en las edificaciones, y por tanto que logren mantenerse en condiciones de servicio. Si este objetivo se cumple, entonces no habrá la necesidad de hacer reparaciones excesivas o diseños estructurales muy robustos. Una forma de clasificar el control está en función de la forma que se aplica esta fuerza, siendo éstos el control pasivo, activo, semi-activo e híbrido.

1.2.1 Control Pasivo

En este tipo de control, los mecanismos utilizados para reducir la respuesta dinámica son inherentes a la estructura. Las fuerzas necesarias para contrarrestar las cargas sísmicas, son generadas en respuesta al mismo movimiento de la estructura. Además, no se necesita ninguna fuente de energía externa para que los dispositivos logren su objetivo.

Un ejemplo de sistemas de control pasivo, son los aisladores de base. El sistema de aisladores desacopla la estructura de las componentes horizontales del movimiento del suelo. Colocando elementos con baja rigidez lateral, como bloques de caucho, entre la estructura y la cimentación. El primer uso de los aisladores de caucho fue en 1969 (Figura 1.3), implementados en una escuela de concreto en Skopje, Yugoslavia (Naeim y Kelly, 1999).

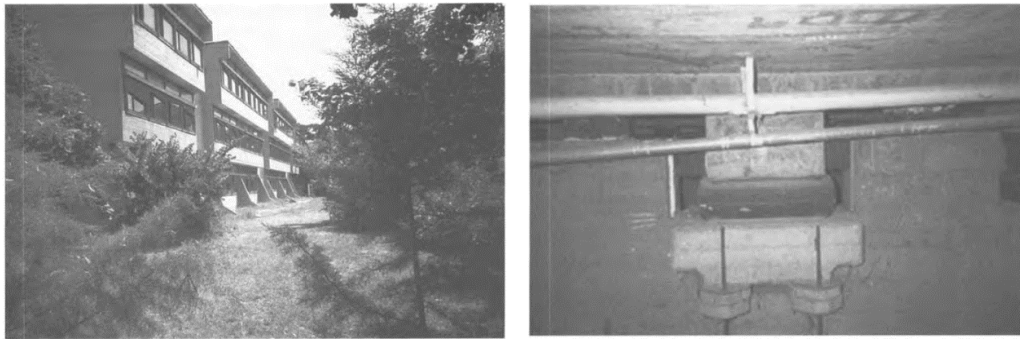


Figura 1.3.- Escuela con aisladores de caucho en la base (Naeim y Kelly, 1999)

Además de los aisladores de base, existen otros sistemas de control pasivo como los amortiguadores de masa resonante (Tuned Mass Dampers, TMD), comúnmente aplicados en edificios de gran altura. En este tipo de control se coloca una masa adicional (m) que equivale aproximadamente al 1% de la masa total (M) de la estructura. Regularmente la masa se localiza en el techo de la estructura y se conecta por medio de un amortiguador y un resorte (Housner et al., 1997). Los dispositivos TMD se basan en el concepto de amortiguador de vibraciones dinámicas (Dynamic Vibration Absorbers)

(Figura 1.4) desarrollado por Frahm en 1909. Este concepto consiste en que, si la frecuencia de la masa adicional es similar a la frecuencia de la carga aplicada, el sistema es capaz de absorber vibraciones indeseables. El movimiento de la masa “M” será nulo y la masa “m” estará sujeta a una fuerza equivalente, pero en sentido opuesto, a la carga aplicada (Hartog, 1947).

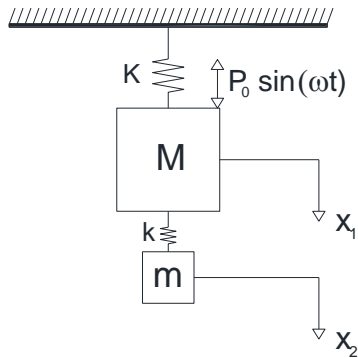
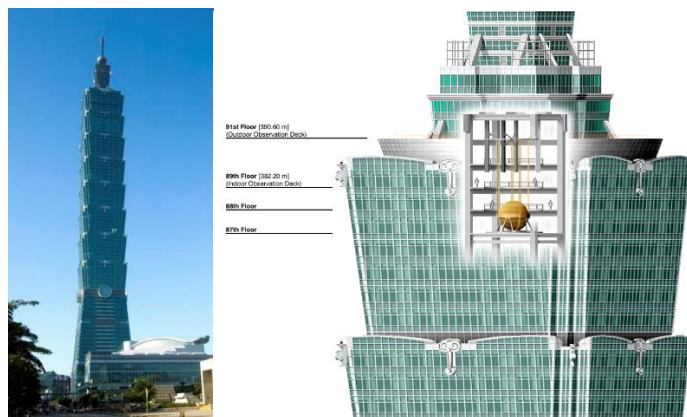


Figura 1.4.- Amortiguador de Vibración Dinámica desarrollado por Frahm en 1909 (adap. Hartog, 1947)



a) http://www.trekearth.com/gallery/Oceania/Australia/East/New_South_Wales/Sydney/photo748993.html



b) <http://99percentinvisible.org/episode/supertall-101/>

Figura 1.5.- Edificios en los que se han ocupado Amortiguadores de Masa Resonante a) Centerpoint Tower b) Torre Taipei 101

1.2.2 Control Activo

En este tipo de control se utilizan dispositivos que son capaces de disipar y aplicar energía a la estructura para modificar su respuesta. Se aplican fuerzas que varían en función de las mediciones de perturbaciones externas o de la respuesta estructural. Para registrar dichas mediciones usualmente se utilizan sensores de aceleración. Posteriormente, se procesa la información y se calculan las fuerzas de control requeridas. Una desventaja de estos sistemas es que, así como son diseñados para reducir la respuesta, también son capaces de generar movimiento estructural. Esto implica que un sistema de control incorrecto puede llegar a desestabilizar al sistema y colapsarlo. Otra desventaja es que este tipo de control necesita grandes cantidades de energía para activar los dispositivos (Datta, 2003). Al igual que en el control pasivo existen distintas herramientas para poder aplicar un control activo en una estructura. A continuación, se describirán brevemente algunas de ellas.

1.2.2.1 Amortiguadores de Masa Activos

Amortiguador de Masa Activo o AMD por sus siglas en inglés, puede considerarse como una evolución del amortiguador de masa sintonizada (TMD). Los TMD tienen una frecuencia única y solo es posible sintonizarlo con un solo periodo de vibración externa. En los sistemas AMD se coloca un actuador entre la estructura y la masa añadida (Figura 1.6). El actuador aplica una fuerza en la masa adicional, por lo que con esta fuerza será posible modificar o aplicar desplazamiento en la masa. Debido a esta configuración es posible modificar la frecuencia de vibración de la masa y hacer que vibre en la frecuencia requerida.

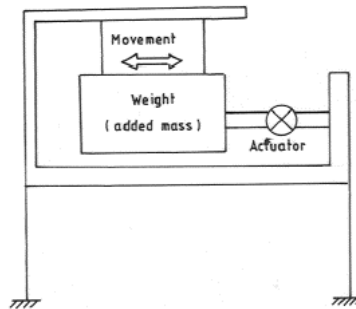


Figura 1.6.- Esquema de un amortiguador de masa activo, AMD. (Datta, 2003)

Los AMD son considerados como la primera aplicación en escala real de un sistema de control estructural activo. Una de las primeras aplicaciones fue implementada en el edificio de 10 niveles Kyobashi Seiwa en Tokyo (Japón) en el año de 1989. El sistema de control consiste de 2 masas de acero con actuadores hidráulicos. Una masa de 4200 kg, equivalente al 1 % de la masa del edificio, habilitada para reducir la vibración en dirección-x. La segunda masa, con la mitad de peso de la primera, es utilizada para reducir la vibración torsional (Ikeda, 2000).

Otra aplicación de este sistema se encuentra en el edificio ANDO Nighikicho en Chiypda-Ku, Tokio. El sistema de control de esta estructura consta de una masa sintonizada (TMD) de 18 ton al cual se le coloca encima un AMD de 2 ton (Figura 1.7). Este tipo de sistema, llamado Duox, se implementó para que, cuando el dispositivo de control activo llegue a fallar, el control pasivo provea a la estructura de los requerimientos mínimos de control de la respuesta.

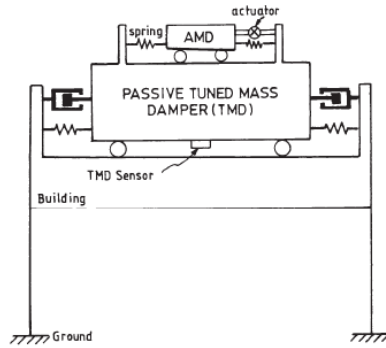


Figura 1.7.- Esquema del sistema de control activo Duox (Datta, 2003).

1.2.2.2 Sistemas de Tendones Activos

Los tendones activos constan de cables pre-esforzados conectados en diagonal en la parte superior del marco estructural. Los tendones también se conectan a un actuador colocado en la parte inferior del marco, con el que es posible controlar la tensión de los cables para disminuir la respuesta estructural (Figura 1.8). Una ventaja de los tendones activos es que no es tan complicado implementarlos en estructuras existentes (Cheng, 2008). También, es posible que los actuadores únicamente se enciendan en caso de sismos fuertes. En caso de sismos moderados, el sistema de control queda apagado y los cables funcionan como un sistema de control pasivo (Yu y Thenozhi, 2016).

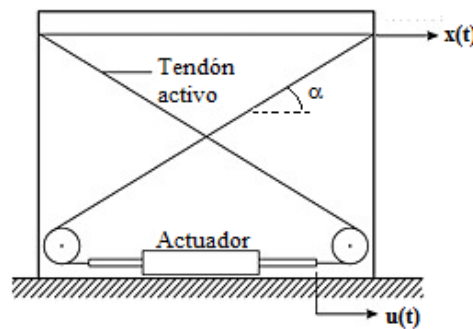


Figura 1.8.- Esquema de un sistema de tendón activo (adap. Cheng, 2008)

1.2.2.3 Sistemas de Contravientos Activos

Sistema similar a los tendones activos con la diferencia que se utilizan contravientos típicos, como contravientos en “X”, tipo chevron, o diagonales. Igualmente, se colocan actuadores hidráulicos, capaces de aplicar una fuerza de control. Un ejemplo, que se puede observar en la Figura 1.9, consta de contravientos metálicos tipo chevron conectados con un actuador hidráulico en la parte superior del marco (Cheng et al., 2008).

1.2.3 Control Semi-Activo

Los dispositivos de control semi-activo son en esencia mecanismos pasivos, que desarrollan fuerzas en respuesta al movimiento estructural. La diferencia radica en que las fuerzas que se oponen al movimiento, pueden ser controladas o modificadas con un proceso similar al del control activo.

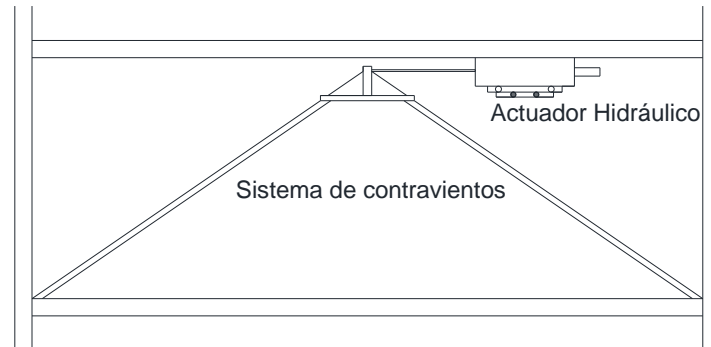


Figura 1.9.- Esquema de un sistema de contravientos activos (adap. Cheng, 2008)

Existe gran variedad de dispositivos utilizados en las estructuras de control semi-activo. Algunos ejemplos son: dispositivos de rigidez controlable, fricción controlable, amortiguadores con fluidos controlables.

1.2.3.1 Dispositivos de rigidez controlable

La principal función de los dispositivos de rigidez controlable, es cambiar la frecuencia natural del sistema para evitar condiciones de resonancia durante un sismo. Estos dispositivos están conformados por un arreglo de contravientos, junto con un cilindro hidráulico con una válvula de control (Figura 1.10). Cuando la válvula se encuentra cerrada, el líquido no puede fluir, bloquea a la viga de los contravientos y estos últimos aportan rigidez a la estructura. En caso contrario, si la válvula está abierta, el líquido fluye, y desacopla la conexión viga-contraviento y no se incluye la rigidez de los contravientos (Symans y Constantinou, 1999).

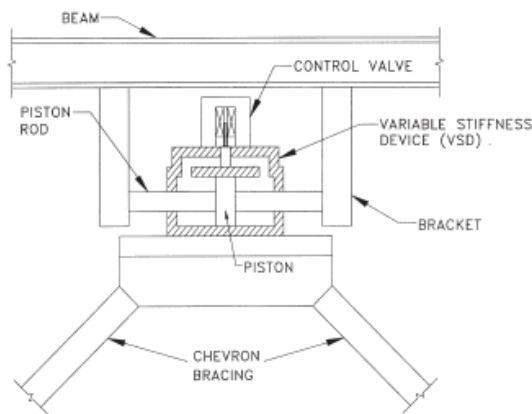


Figura 1.10.- Esquema de un dispositivo de rigidez controlable (Symans y Constantinou, 1999)

1.2.3.2 Amortiguadores con Fluidos Controlables

Los amortiguadores con fluidos controlables constan de pistones con materiales electrorreológicos o magnetoreológicos (Figura 1.11). Estos materiales cambian sus propiedades con la aplicación de campos eléctricos o magnéticos, respectivamente. Tienen la capacidad de pasar de un fluido viscoso a un semisólido con resistencia a la fluencia (Housner et al.,1997). Así se obtienen fuerzas de amortiguamiento controlables en las estructuras. Una ventaja de estos dispositivos semi-activos, es que, a falta de energía se comportaran como amortiguadores pasivos (Fisco y Adeli, 2011).

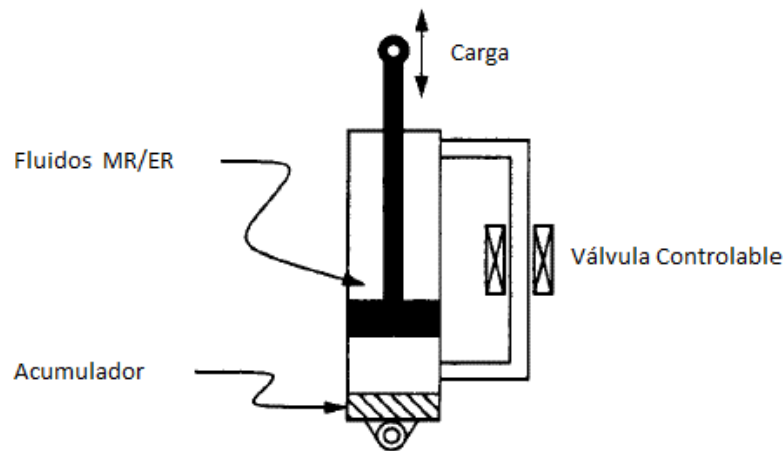


Figura 1.11.- Esquema de un amortiguador de fluidos Controlables (Housner et al.,1997).

1.2.3.3 Amortiguadores de fricción Controlables

Son disipadores de energía por medio de una superficie de fricción dentro de los contravientos (Figura 1.12). La interfaz de deslizamiento es controlada, por medio de una fuerza de sujeción aplicada. Dicha fuerza es monitoreada durante la aplicación de perturbaciones externas, modificando las propiedades dinámicas de la estructura.

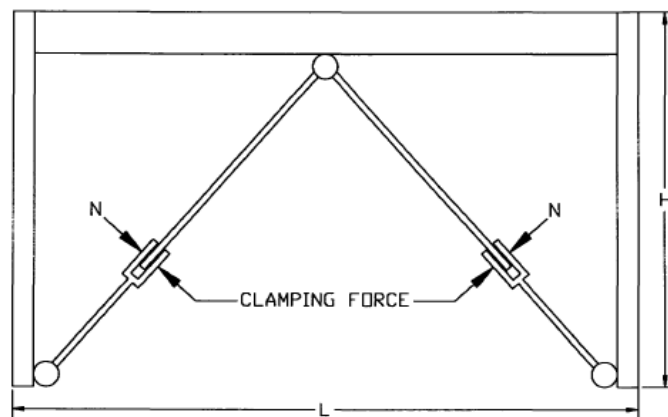


Figura 1.12.- Amortiguadores de Fricción controlable (Akbay y Aktan, 1995)

1.2.4 Control Híbrido

Los sistemas de control híbrido, consisten en la combinación de algún dispositivo activo con uno pasivo. La finalidad es que, si llega a fallar el control activo por falta de energía, el control pasivo permanece en la estructura. También, complementan las deficiencias de un dispositivo pasivo con un activo, como los aisladores de base híbridos. Estos consisten de un sistema de aisladores de base en conjunto con actuadores de control activo. Dado que los aisladores de base sólo son capaces de reducir las distorsiones de entrepiso y las aceleraciones absolutas, siempre y cuando existan grandes desplazamientos en la base. La combinación con un actuador activo, puede permitir la reducción de distorsiones de entrepiso, al mismo tiempo que limita el máximo desplazamiento en la base (Housner et al. 1997).

1.3 Generalidades del Control Activo y Semi-Activo

El control activo y semi-activo, son diferentes alternativas para mejorar el desempeño estructural. Estos dos métodos se basan en la aplicación de energía externa a la estructura, por medio de distintos mecanismos. Su principal diferencia radica en que el control activo, se aplican fuerzas que se oponen al movimiento. Esta capacidad de oposición conlleva a tener un gran consumo de energía. Por otro lado, el control semi-activo sólo es capaz de oponerse al movimiento, y no requiere una gran cantidad de energía para su operación.

En cualquiera de los dos tipos de control estructural, se aplican fuerzas externas para mejorar el desempeño del sistema. Una forma de explicar las capacidades del control activo y semi-activo es a través del diagrama de la figura 1.13, en donde, para el control semi-activo la fuerza sólo se aplicará si va en el mismo sentido que la velocidad. En el caso del control activo la fuerza puede aplicarse en cualquier sentido, sin importar el sentido de la velocidad.

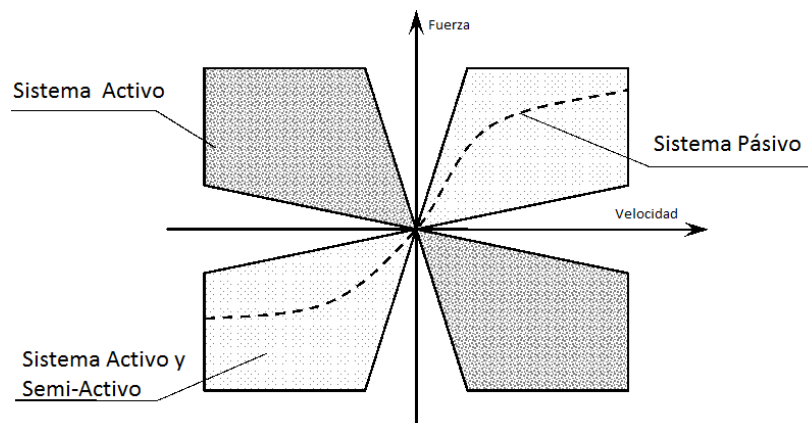


Figura 1.13.- Diagrama de la aplicación del control activo y del semi-activo.

1.4 Esquemas de Retroalimentación de Lazo Cerrado

Para la aplicación de los dos tipos de control, se utilizan esquemas de retroalimentación de lazo cerrado (Figura 1.14). Estos tipos de diagramas engloban distintos elementos que se describen a continuación.

La planta, es la que contiene las propiedades de la estructura, tales como rigidez, masa y amortiguamiento. En la excitación externa se consideran las perturbaciones, tales como sismo o viento. La excitación externa y la respuesta estructural son registradas por medio de sensores. Todas las señales que se registran son enviadas al controlador, el cual consiste en un algoritmo que calcula las fuerzas de control. Los algoritmos procesan las señales de los sensores y calculan comandos de fuerza que se envían a los dispositivos para su aplicación en la estructura.

Dentro de la ingeniería de control, existen varios algoritmos que se pueden implementar en el control de estructuras. Algunos tipos de algoritmos de control son: Control Proporcional-Integral-Derivativo (PID), Control Óptimo (LQR y LQG), Control H_∞ , control inteligente como redes neuronales, lógica difusa y algoritmos genéticos (Yu y Thenozhi, 2016).

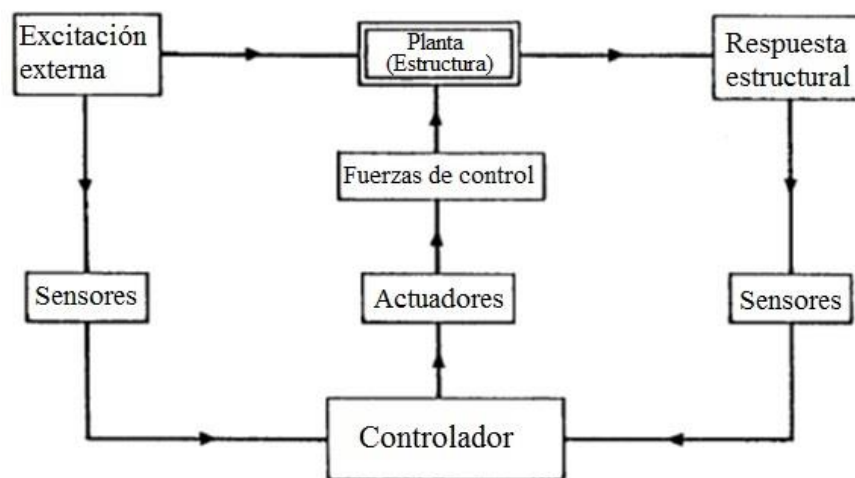


Figura 1.14.- Esquema de un sistema de control por retroalimentación (Soong et al.,1991)

1.5 Motivación

Como se presentó, existen diferentes tipos de control estructural (activo, pasivo, semiactivo e híbrido), así como algoritmos para su aplicación. Sin embargo, no se encontró en la literatura algún tipo de guía sobre el tipo de control y algoritmo recomendado de acuerdo al tamaño de la estructura (baja, media y gran altura). Por lo anterior, se decidió investigar el comportamiento de tres de los algoritmos de control más comúnmente utilizados (PID, LQR y LQG), aplicados a edificios de diferentes alturas. El objetivo general propuesto para este trabajo queda expresado de la siguiente manera.

1.6 Objetivo General

- Investigar el nivel de desempeño, ante diferentes índices, de tres algoritmos de control para sistemas activos y semi-activos en marcos planos.
- Proponer una metodología de selección del algoritmo de control adecuado en función de la altura o rigidez y tipo de control

1.6.1 Objetivos Específicos.

- Investigar el comportamiento, ante diferentes índices de desempeño, del algoritmo **Proporcional, Integral y Derivador (PDI)**, en tres marcos planos ante sistemas activos y semi-activos.
- Investigar el comportamiento, ante diferentes índices de desempeño, del algoritmo **Regulador Cuadrático Lineal (LQR)** en tres marcos planos ante sistemas activos y semi-activos.
- Investigar el comportamiento, ante diferentes índices de desempeño, del algoritmo **Gaussiano Cuadrático Lineal (LQG)**, en tres marcos planos ante sistemas activos y semi-activos.
- Comparar el comportamiento de los tres algoritmos en sistemas activos y semi-activos.
- Proponer una metodología para determinar el algoritmo de control con mejor comportamiento en función de la altura de la estructura, y el tipo de control requerido (activo o semi-activo).

Capítulo 2.- Estado del Arte

En este capítulo se describirán algunos trabajos en donde se han estudiado sistemas de control activo o semi-activo. Además, en estos trabajos se describe o estudia el comportamiento de algoritmos de control en distintos sistemas estructurales.

En 1999 Kurata y colaboradores presentan la primera aplicación de un sistema de amortiguadores hidráulicos semi-activos (SHD). Se trata de un edificio de oficinas de cinco niveles localizado en Shizuoka, Japón (Figura 2.1). La estructura tiene ocho SHD con sus respectivos contravientos en los primeros cuatro niveles, en la dirección corta del edificio. El sistema cuenta con: sensores de velocidad en cada nivel, computadoras en el cuarto de control situada en el primer nivel, y un respaldo de energía eléctrica.

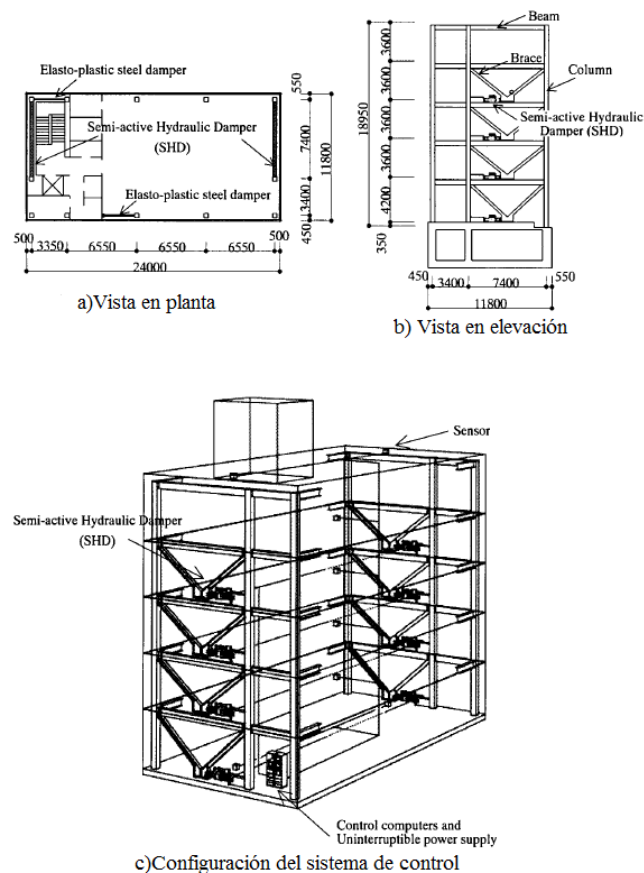


Figura 2.1.- Esquemas de la estructura de 5 niveles con SHD (Kurata et al., 1999)

La estructura se analizó con un modelo de masas concentradas por nivel. La rigidez lateral de marcos (K_f), contravientos (K_b) y amortiguadores (K_d) se representó con resortes equivalentes de cortante (Figura 2.2). Se consideró un amortiguamiento del 2% inherente a la estructura para el periodo natural. Además, se consideró un coeficiente de amortiguamiento variable ($c(t)$) correspondiente al amortiguador hidráulico. Los primeros tres periodos sin tomar en cuenta los amortiguadores hidráulicos fueron: 0.992 s, 0.354 s y 0.222 s. Para evaluar el modelo analítico se utilizaron los siguientes registros sísmicos: El Centro NS (1940), Taft NS (1952), Hachinohe NS (1968) y el

registro artificial Tokai. Cada registro real se escaló para obtener velocidades máximas de 25 y 50 cm/s.

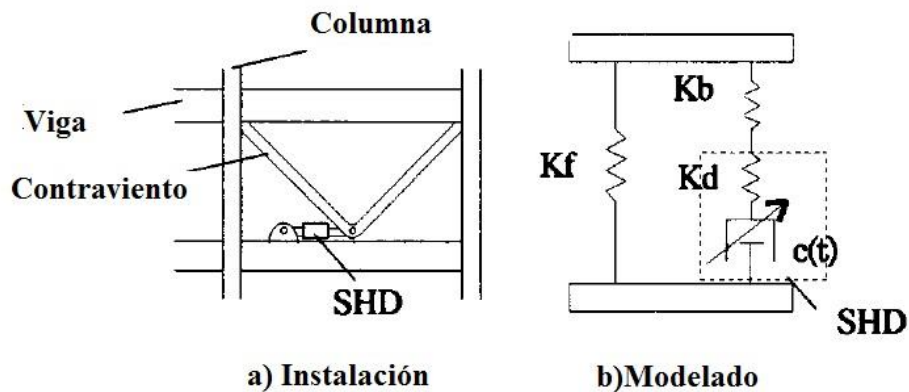


Figura 2.2.- Instalación y modelado de un Amortiguador Hidráulico Semi-activo (SHD) (Kurata et al., 1999)

En este trabajo se adoptó el algoritmo Regulador Cuadrático Lineal (LQR). En este algoritmo se calculan factores llamados ganancias que al multiplicarse por la señal de respuesta se obtiene el comando de la fuerza de control. Para calcular la ganancia es necesario definir la variable “Q”, que cuantifica la importancia de lo que se está controlando y la variable “R”, que se relaciona con la importancia de las fuerzas de control que se utilizarán. En este trabajo, para el cálculo del comando de control, a “Q” le asignaron un valor constante unitario y a “R” cinco valores distintos (0.4, 0.1, 0.06, 0.03 y 0.01). Dados los valores de dichos parámetros es posible calcular las ganancias del sistema de control (G1, G2, G3, G4 y G5).

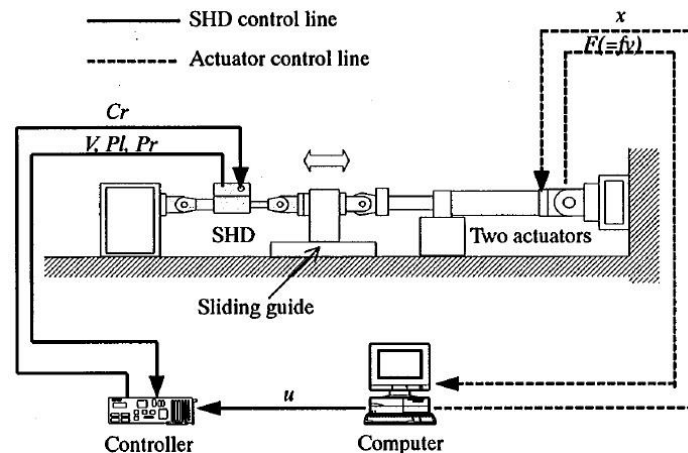


Figura 2.3.- Composición del equipo de prueba (Kurata et al., 1999)

Los resultados analíticos con “G4” fueron utilizados para ajustar las ganancias del controlador y se utilizaron en una prueba experimental del amortiguador hidráulico semi-activo (Figura 2.3). En esta prueba se aplicaron, con un par de actuadores, desplazamientos correspondientes a la distorsión de entepiso de los resultados analíticos. A su vez se ejecutó el comando correspondiente para el cálculo de la fuerza ejercida por el amortiguador hidráulico. Con esta prueba se compararon la fuerza de amortiguamiento real del dispositivo y el comando del SHD instalado en el primer y tercer nivel. La

fuerza y el comando son compatibles para las ganancias G3 Y G4 sin importar el entrepiso ni la velocidad máxima de la excitación. Como los resultados de la fuerza y comando de control son muy cercanos se concluye que hubo un buen desempeño del sistema de control para los cuatro sismos (Figura 2.4). Además, los SHD en estructuras reales resultaron efectivos controlando la respuesta estructural ante los registros sísmicos que utilizaron.

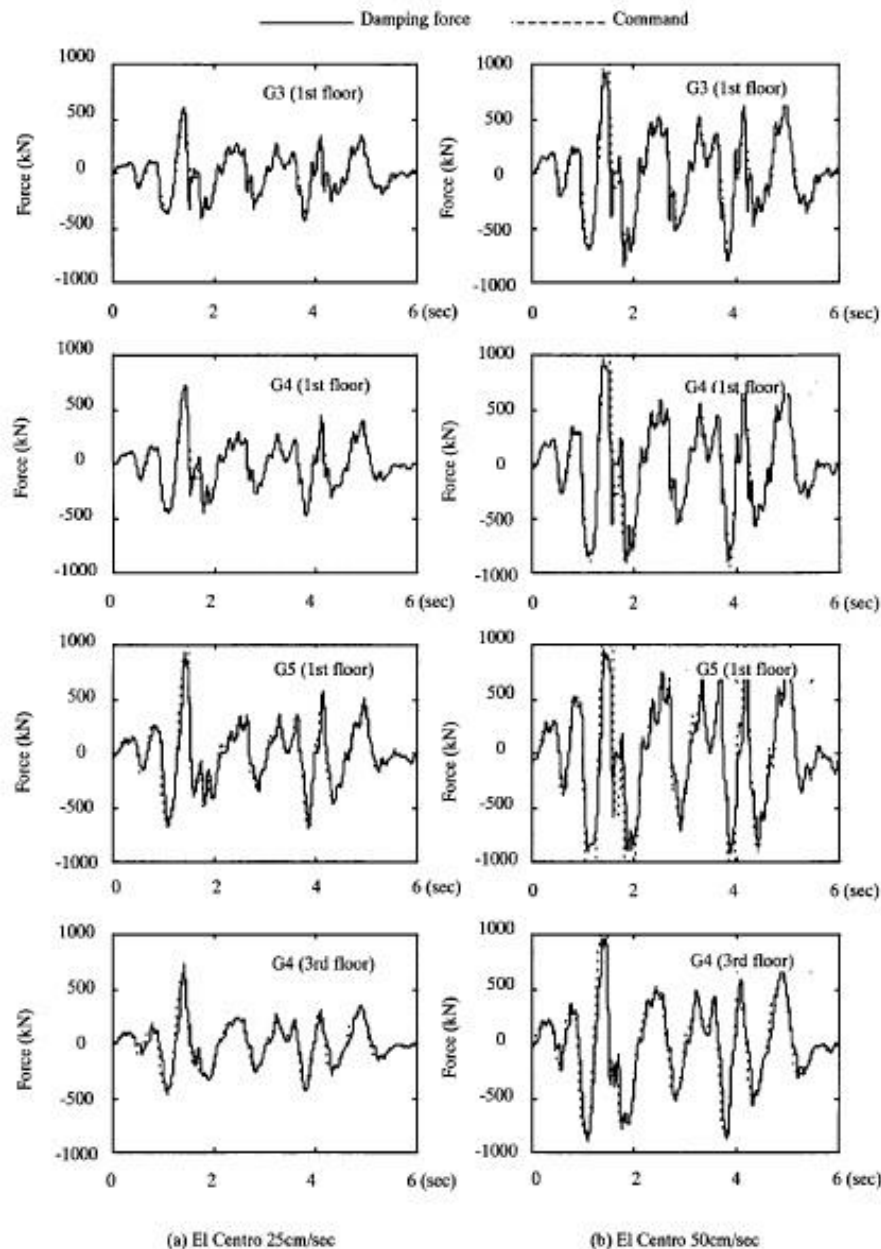


Figura 2.4.- Efecto de las ganancias de control y la amplitud del sismo de entrada (Kurata et al., 1999)

Nerves y Krishnan (1995) compararon cinco estrategias de control las cuales fueron: control proporcional, control óptimo LQR, control en modo deslizante, control por redes neuronales y el control difuso adaptativo. Las cinco estrategias se aplicaron en el modelo de una estructura alta con amortiguadores de masa sintonizada activos (AMD). Este tipo de dispositivos de control son útiles para disminuir el movimiento en el primer modo fundamental del sistema. El modelo estructural fue

representado como un sistema no lineal (modelo Bouc-Wen) de un solo grado de libertad (1GDL). Ya que con modelos de 1GDL se da una buena aproximación del movimiento estructural en el primer modo.

Las simulaciones de la estructura controlada se hicieron con excitaciones de sismo y viento. Con la respuesta resultante, se obtuvo el valor máximo del desplazamiento (y_{\max}), la norma del desplazamiento (y_{norm}), fuerza de control máxima (u_{\max}) y la raíz media cuadrática de la fuerza de control (u_{rms}) (Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Comparación de controladores (adap. Nerves y Krishnan, 1995)

CASO	y_{\max} [cm]	y_{norm} [cm]	u_{\max} [kN]	u_{rms} [kN]
Viento/P	2.480	35.152	65	21
Viento/LQR	2.332	52.884	285	120
Viento/SM	1.247	21.241	926	432
Viento/NN	2.249	31.756	189	88
Wind/AF	2.479	22.192	169	41
Sismo/P	28.69	664.71	754	356
Sismo/LQR	21.96	359.71	3282	664
Sismo/SM	16.77	284.47	1790	515
Sismo/NN	6.51	150.18	7342	3051

De acuerdo con los resultados, se concluyó que el control proporcional es útil para controlar el desplazamiento producido por el viento; sin embargo, es ineficiente ante una excitación sísmica. El algoritmo LQR es útil tanto para excitaciones sísmicas como eólicas. El control deslizante sólo adquiere una ligera ventaja sobre el LQR debido a las características no lineales del sistema. En general, para un mayor decremento en respuesta son necesarias grandes fuerzas de control. Por lo tanto, desplazamiento y fuerza deben relacionarse para poder hacer una buena elección del controlador.

Ohtori et al. (2004) presentaron un trabajo cuyo objetivo es establecer bases para la evaluación de la eficiencia de distintos algoritmos de control. Como ejemplo se presenta la aplicación de la estrategia de control activo con el algoritmo Gaussiano Cuadrático Lineal (LQG). El modelo utilizado es de una estructura de 20 niveles que pertenece al proyecto SAC de la región de Los Ángeles, California.

En el modelo de los marcos estructurales en dos dimensiones se incluye el comportamiento no lineal de los elementos. Para caracterizar la no linealidad se utiliza un modelo histérico bilineal utilizando el método Newmark- β .

El algoritmo de control LQG consiste en la combinación del control LQR con un estimador de estados como el filtro Kalman. Además, en el control LQG se toma en cuenta ruido blanco gaussiano, tanto para las señales de entrada (aceleraciones del terreno) como para las señales de salida (respuesta del sistema).

En el modelo de la estructura se implementaron 25 actuadores colocados con contravientos tipo Chevron. Se ubican cuatro actuadores en el primer nivel, dos en el segundo, dos en el tercero y uno en cada nivel subsecuente.

Los sismos con los que se analizó la estructura con y sin control fueron: Imperial Valley, el centro N-S, Hachinohe N-S, Sylmar para el sismo de Northridge N-S y el registro de la agencia meteorológica japonesa Kobe para el sismo de esa ciudad. Los acelerogramas de los primeros dos

registros fueron escalados con factores de 0.5, 1.0 y 1.5. Los otros dos sismos únicamente se escalan con factores de 0.5 y 1.0.

Para la evaluación de la eficiencia de los algoritmos se propusieron índices de desempeño, en donde, valores pequeños de cada uno significa mejor comportamiento del controlador. Los índices utilizados fueron divididos en cuatro categorías de evaluación:

1. La categoría de respuesta estructural incluye tanto los valores máximos como la norma de: distorsión de entrepiso, aceleración y cortante basal
2. En la categoría de daño estructural se evalúa la ductilidad máxima, energía disipada, conexiones plásticas y la norma de ductilidad.
3. La categoría de dispositivos de control se evalúa con las fuerzas de control, la carrera de los dispositivos, valor máximo y norma de la energía de control.
4. En la categoría de requerimientos de la estrategia de control se registran el número de dispositivos, número de sensores y recursos computacionales utilizados.

Yu y Thenozhi (2014) estudiaron la estabilidad de los controladores activos: Proporcional y Derivativo (PD) y el Proporcional, Integral y Derivativo (PID), comparándolos con un control de modo deslizante (SMC). Un controlados SMC es un tipo de controlador robusto que aplica una ley de control tipo “switch” y trata de llevar al sistema hacia una superficie especificada. En sistemas estructurales la superficie corresponde al punto en el cual se requiere que permanezca el sistema.

Los controles PD y PID se fundamentan en que la fuerza de control se calcula a partir de dos o tres términos relacionados con la respuesta estructural. Cada término será proporcional a: el desplazamiento (K_p), la integral del desplazamiento (K_i) y la derivada del desplazamiento (K_d).

La estabilidad del control PD, se propone a partir del espacio de estados del sistema incluyendo las ganancias K_p y K_d (Ec 2.1 a y b). Ellos proponen como ejemplo un sistema de 2 GDL con un dispositivo de control. En este caso su estabilidad dependerá del polinomio característico de la matriz A_{cl} (Ec. 2.2).

$$\dot{z} = A_{cl}z + f_{cl} \quad (2.1 a)$$

$$A_{cl} = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} \\ -M^{-1}(K + \Gamma K_p) & -M^{-1}(C + \Gamma K_d) \end{bmatrix} \quad (2.1b)$$

$$\det(sI - A_{cl}) = s^4 + a_1s^3 + a_2s^2 + a_3s + a_4 \quad (2.2)$$

De acuerdo con el criterio de Lienard Chipart, el sistema correspondiente a A_{cl} será estable, si se cumplen las siguientes condiciones:

$$a_i > 0, i = 1, 2, 3, 4 \quad \text{y} \quad a_1a_2a_3 - a_1^2a_4 - a_3^2 > 0 \quad (2.3)$$

Estas condiciones consideran que se trata de un sistema lineal, así que los parámetros de rigidez (K), masa (M) y amortiguamiento (C) son constantes y bien definidos. Por lo tanto, los únicos valores que se tienen que ajustar, en un sistema estable, son K_p y K_d .

Cuando se tiene un sistema de control PID, la estabilidad de la estructura dependerá de que se cumplan las siguientes condiciones:

$$\lambda_m(K_p) \geq \frac{3}{2}[k_f + k_c] \quad (2.4a)$$

$$\lambda_M(K_i) \leq \phi \frac{\lambda_m(K_p)}{\lambda_M(M)} \quad (2.4b)$$

$$\lambda_m(K_i) \geq \phi[1 + \frac{k_c}{\lambda_M(M)}] - \lambda_m(C) \quad (2.4c)$$

$$\phi = \sqrt{\frac{1}{3}\lambda_m(M)\lambda_m(K_p)} \quad (2.4d)$$

$$k_c = \|C\| \quad (2.4e)$$

En donde (k_f) se define como el límite inferior de la integral $\int_0^t f dx$, en donde f está compuesta por la suma de: la fuerza restauradora ($f_s = Kx$), la fuerza de excitación $f_s = M\ddot{x}_g$ y el vector de fuerza del amortiguamiento y fricción de los dispositivos (d).

Para comparar el desempeño de los algoritmos PD, PID y SMC se hizo un ejemplo numérico de una estructura de dos niveles con un dispositivo en el segundo nivel. El algoritmo SMC es otro controlador robusto comúnmente utilizado. Para dicho ejemplo se establecen las propiedades del sistema; matrices de masa, amortiguamiento y rigidez. Además, las ganancias de los controladores PD y PID son propuestas para que cumplan las condiciones establecidas por las ecuaciones 2.3 y 2.4.

Se hace el análisis del sistema, sujeto a un escalón unitario constante. Cada tipo de control se aplica al modelo para llevar las vibraciones lo más cercanas a cero. Las señales de control son aplicadas directamente, despreciando las limitantes de los dispositivos de control.

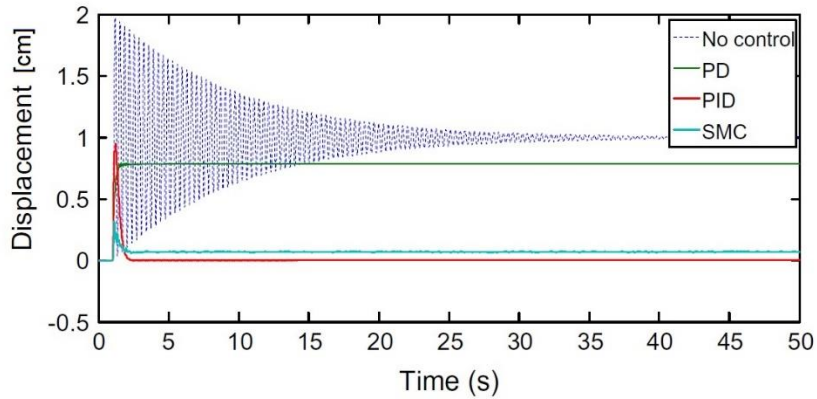


Figura 2.5.- Respuesta del sistema sujeto a un escalón unitario (Thenozhi y Yu, 2014)

El desplazamiento [cm] del segundo piso se muestra en la Figura 2.5. En donde es posible observar que el control PD reduce las oscilaciones, pero permanece con un gran error en la respuesta estacionaria. Al utilizar el algoritmo PID es posible lograr que el sistema tenga un error en estado estacionario de cero. La respuesta del controlador SMC queda muy cercana a cero, entre el PD Y el

PID. El problema del SMC es que la señal de control contiene varias conmutaciones de alta frecuencia (Figura 2.6 c), que podrían no ser aceptadas por las capacidades del actuador.

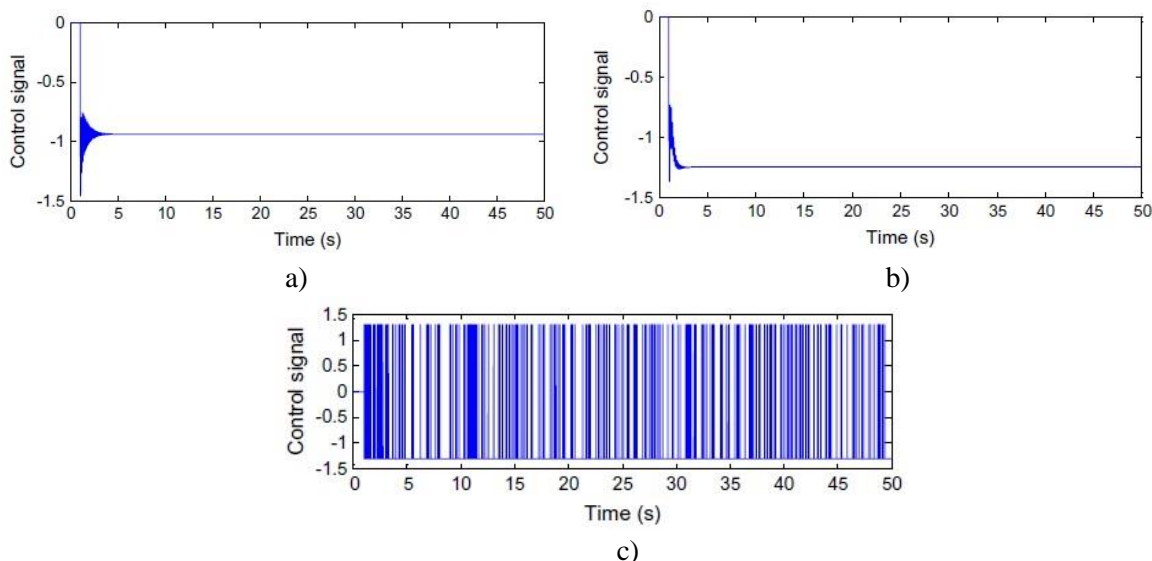


Figura 2.6.- Señales de control para a) PD, b) PID y c) SMC

Para corroborar los resultados del análisis teórico, se construyó un modelo de una estructura de dos niveles con un dispositivo AMD en el segundo nivel. Este prototipo se ensayó sobre una mesa vibradora en la que se simuló el sismo de Loma Prieta E-O. Las ganancias de los controladores PD y PID se ajustaron con los mismos valores de K_p y K_d . En la tabla 2.2 se muestran los valores del error medio cuadrático del desplazamiento. En el caso del controlador PD la reducción desplazamiento es significativa. Pero, los resultados demostraron que el controlador PID tuvo un mejor desempeño, lo que es congruente con el análisis teórico.

Tabla 2.2.- Comparación de la atenuación de la vibración obtenida usando controladores PD y PID (Thenozhi y Yu, 2014)

Acción de Control	Control PD	Control PID	Sin Control
Piso 1- desplazamiento	0.1699	0.1281	1.0688
Piso 2- desplazamiento	0.5141	0.3386	3.3051

Con estos trabajos previamente descritos, se tiene información de que los algoritmos que se analizarán en esta tesis pueden ser aplicados en sistemas de control estructural. Además, se observa que cada algoritmo tiene distintas características y diferentes resultados en un sistema de control. En el siguiente capítulo se detallarán todas las peculiaridades de cada algoritmo y su aplicación al control de estructuras.

Capítulo 3.- Algoritmos de Control

3.1 Generalidades

Para conocer el comportamiento dinámico de un sistema de varios grados de libertad, como un edificio, es necesario definir la ecuación de movimiento (ec.3.1). Esta expresión es una ecuación diferencial de equilibrio entre las fuerzas restitutivas y fuerzas externas en una estructura.

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = B_{sd}F_c - M\ddot{q}_g \quad (3.1)$$

Las fuerzas de inercia se obtienen con la matriz de masas concentradas (M), multiplicada por el vector de aceleraciones (\ddot{q}). Con la matriz de amortiguamiento (C), multiplicada por el vector de velocidades (\dot{q}), se calcula la fuerza de amortiguamiento. Por último, las fuerzas elásticas resultan del producto de la matriz de rigidez (K) por el vector de desplazamientos (q). Las fuerzas de excitación se calculan a partir de la matriz M multiplicada por la aceleración del terreno (\ddot{q}_g). En el caso de dispositivos de control, se multiplica la fuerza requerida de control (F_c) por una matriz de posicionamiento (B_{sd})

Con la finalidad de estudiar la dinámica y el control estructural, resulta apropiado representar la ecuación de movimiento como un espacio de estados (ec. 3.2). En donde las matrices (A_{ss} , B_{ss} , C_{ss} y D_{ss}) son conocidas como la representación de estados, “ x ” es el vector de estados, “ u ” el vector de entradas y “ y ” será el vector de salidas (Gawronski, 2004(a)).

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_{ss}x + B_{ss}u \\ y &= C_{ss}x + D_{ss}u \end{aligned} \quad x = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} F_c \\ \ddot{q}_g \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} A_{ss} &= \begin{bmatrix} [0]_{GDL,GDL} & [I]_{GDL,GDL} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} & B_{ss} &= \begin{bmatrix} [0]_{GDL,n\text{disp.}} & [0]_{GDL,1} \\ M^{-1}B_{sd} & [-I]_{GDL,1} \end{bmatrix} \\ C_{ss} &= \begin{bmatrix} [I]_{GDL,GDL} & [0]_{GDL,GDL} \\ [0]_{GDL,GDL} & [I]_{GDL,GDL} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} & D_{ss} &= \begin{bmatrix} [0]_{2*GDL,n\text{disp}} & [0]_{3*GDL,1} \\ M^{-1}B_{sd} & \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.2)$$

La matriz A_{ss} en la representación de estados incluye todas las propiedades inherentes de la estructura como masa, rigidez y amortiguamiento. En la matriz B_{ss} debe expresarse el sitio en el que se aplican las fuerzas externas. En la primera columna se encuentra la matriz inversa de masas multiplicada por la matriz de posicionamiento de las fuerzas de control (B_{sd}). En la segunda columna de la matriz B_{ss} se expresan las fuerzas que experimente cada masa debido a la aceleración del terreno. Los valores que se colocan en la matriz C_{ss} dependerán de cuáles son las respuestas necesarias para analizar el sistema. En este caso la matriz incluye los valores para obtener desplazamiento, velocidad y aceleración de cada GDL. Por último, en la matriz D_{ss} se debe de expresar el posicionamiento de las fuerzas externas de control.

3.2 Algoritmo Regulador Cuadrático Lineal (LQR)

El regulador cuadrático lineal (LQR) es un tipo de algoritmo de control óptimo. Se clasifica como óptimo porque busca la optimización entre la energía aplicada al sistema y la reducción de la respuesta. Es posible encontrar los valores óptimos de este controlador minimizando el índice de desempeño cuadrático (ec. 3.3) que rige a este algoritmo.

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (3.3)$$

En donde Q y R son matrices de ponderación de la respuesta y de la fuerza de control respectivamente (Datta, 2003).

Las matrices Q y R son consideradas como parámetros de diseño propuestos a-priori, con base en las siguientes consideraciones:

- a) *Valores de Q (≥ 0): Valores altos de Q dan prioridad a la reducción de las respuestas sin importar el tamaño de las fuerzas de control o energía requerida. Por otro lado, valores pequeños de Q limitan la aplicación de fuerzas grandes, minimizando éstas sin importar la reducción de las respuestas (Ugarte et al., 2012).*
- b) *Valores de R (> 0): Valores altos de R representan que el ahorro de energía es importante para la aplicación de las fuerzas de control, es decir, el algoritmo busca la mínima fuerza posible para reducir las respuestas. Por otro lado, valores pequeños de R, dan poca importancia al consumo de energía, y por tanto, pueden aplicarse mayores fuerzas de control (Ugarte et al., 2012).*

La fuerza de control óptima se calcula minimizando el índice de desempeño “J” (ec. 3.3), al resolver la ecuación de Ricatti (3.4).

$$P_c A_{ss} + A_{ss}^T P_c - P_c B_{ss} R^{-1} B_{ss}^T P_c + Q = 0 \quad (3.4)$$

$$K_c = R^{-1} B_{ss}^T P_c \quad (3.5)$$

$$F_c = -K_c x \quad (3.6)$$

La solución (P) de esta ecuación, se utiliza en el cálculo de las ganancias “K_c” (3.5) para el comando de las fuerzas de control (3.6) (Kurata et al., 1999).

El esquema de lazo cerrado que se utiliza en este trabajo para la aplicación del controlador LQR se muestra en la figura 3.1. En este caso las entradas de la estructura serán las fuerzas de control y alguna perturbación externa. Las fuerzas de control se calculan a partir de la velocidad y el desplazamiento (vector de estados), multiplicadas por las ganancias obtenidas (K_c). En este trabajo, las ganancias correspondientes al vector de desplazamientos son despreciables. Es por lo anterior que en el esquema de la Figura 3.1 no se conecta el vector de desplazamientos con la ganancia K_c. La matriz de ganancias K_c es posible calcularla con la función de Matlab [K_c=lqr(SYS, Q, R)].

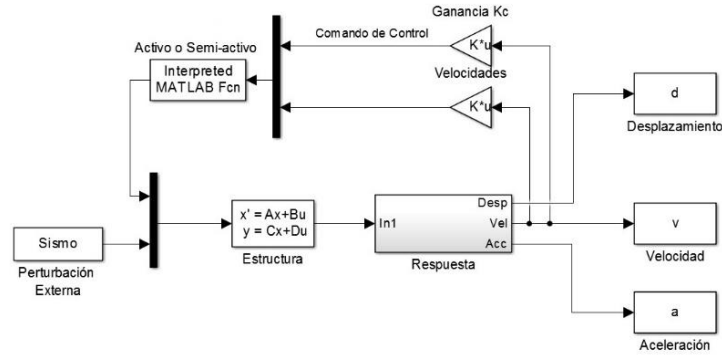


Figura 3.1.- Esquema de lazo cerrado para el control Regulador Cuadrático Lineal (LQR)

3.3 Algoritmo Regulador Gaussiano Cuadrático Lineal (LQG)

La desventaja principal del algoritmo LQR es que todas las variables de estado deben de ser medibles, lo cual resulta difícil aplicado al control estructural. Es posible resolver el problema anterior utilizando el algoritmo Gaussiano Cuadrático Lineal (LQG), ya que dentro de su estructura incluye un filtro Kalman como estimador de estados. Con un controlador LQG, las perturbaciones externas se modelan como señales con ruido blanco gaussiano. También, en lugar de asumir que todos los estados son medibles, se asumen mediciones con el mismo tipo de ruido blanco. Es así como el algoritmo LQG se convierte en la combinación entre un regulador óptimo (LQR) y un estimador de estados óptimo como el filtro Kalman (Rentzos, 2007).

Como se mencionó anteriormente, para utilizar un controlador LQG es necesario asumir ruido en las señales. El cual se incluye en el espacio de estados (ec. 3.7) como ruido en las entradas ($w(t)$) y ruido en las salidas ($v(t)$). Estos ruidos tendrán que asumirse con una distribución de Gauss; con media de cero, no correlacionados en el tiempo y con matrices de covarianza conocidas ($V=E(vv^T)$ y $W=E(ww^T)$) (Gawronski, 2004(b)).

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A_{ss}x + B_{ss}u + Ew(t) \\ y &= C_{ss}x + D_{ss}u + v(t)\end{aligned}\tag{3.7}$$

Los controladores LQG también se basan en la minimización de un índice de desempeño “J” (ec.3.8). En donde “ $E\{\cdot\}$ ” denota el operador estadístico de esperanza matemática (Rentzos, 2007). En el caso del algoritmo LQG, las matrices de ponderación (Q y R) se proponen de la misma forma que en el controlador LQR. La matriz Q pondera la reducción de la respuesta, de manera similar, la matriz R lo hace con las fuerzas de control.

$$J = E \left\{ \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \right\}\tag{3.8}$$

Para poder minimizar el índice J, resulta conveniente dividir el problema en dos partes. Primero se tendrán que obtener las ganancias del regulador, las cuales serán las mismas que las calculadas con el control LQR (3.5). En la segunda, se tendrá que minimizar la esperanza matemática del error cuadrático en la estimación de estados (ec. 3.9). Para poder llegar a la solución de la expresión 3.9 se

utiliza el filtro Kalman y se obtiene la estimación del espacio de estados con la ecuación 3.10 (Rentzos,2007).

$$\min E \left\{ (x - \hat{x})^T (x - \hat{x}) \right\} \quad (3.9)$$

$$\dot{\hat{x}} = A_{ss} \hat{x} + B_{ss} u + K_e (y - C_{ss} \hat{x} - D_{ss} u) \quad (3.10)$$

Para calcular el vector de estados estimado (3.10) es necesario definir la ganancia del estimador (K_e), la cual se obtiene con la solución de la ecuación algebraica de Ricatti (3.11). En esta ecuación se tienen como datos las matrices de la representación de estados (A_{ss} y C_{ss}), además de la matriz de covarianza del ruido en las entradas (V). Resolviendo la ecuación se obtiene el valor de P_e , con el cual es posible calcular la ganancia del estimador (3.12) (Gawronski (b), 2004).

$$A_{ss} P_e + P_e A_{ss}^T - P_e C_{ss}^T C_{ss} P_e + V = 0 \quad (3.11)$$

$$K_e = P_e C^T \quad (3.12)$$

Para tener una idea más clara del funcionamiento del controlador con un estimador de estados, es útil observar el diagrama de la figura 3.2. En este trabajo se utiliza un esquema utilizado con el programa Simulink que se muestra en la Figura 3.3.

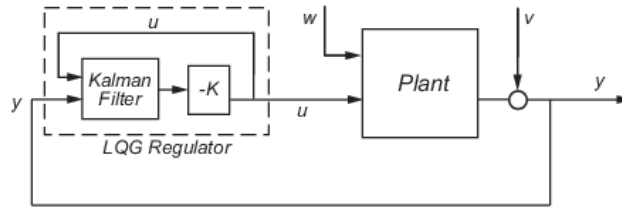


Figura 3.2.- Esquema de lazo cerrado representando el regulador LQG (MathWorks, 1)

Cabe destacar que en el caso del control LQG no sólo se obtiene una ganancia K_c , si no que las ganancias se establecen por medio de un nuevo espacio de estados. Este espacio de estados, conocido como regulador, se calcula con la función de MatLab [lqg (SYS,QXU,QWV)]. Los datos necesarios en esta función serán: el espacio de estados del sistema (SYS), la matriz que incluye los valores de las matrices de ponderación (QXU) y la matriz con valores de las matrices de covarianza de los ruidos (QWV).

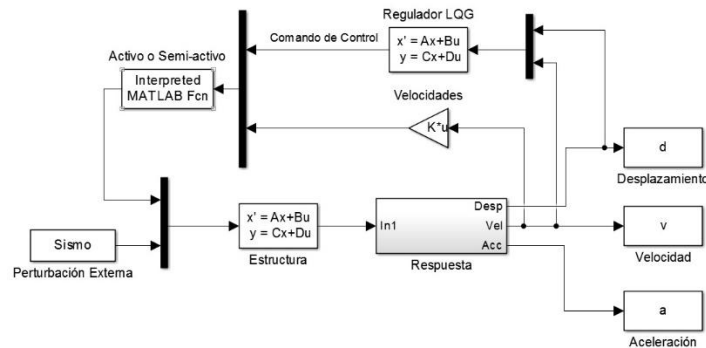


Figura 3.3.- Esquema de lazo cerrado de un controlador LQG utilizado con el programa SimuLink

3.4 Algoritmo Proporcional, Integral y Derivado (PID)

El control PID es actualmente uno de los más utilizados en el ramo de los controladores industriales. Como su nombre lo dice se define en tres partes: proporcional, derivada e integral del error. La ley de control es expresada con la ecuación 3.13a, en la cual el error $e(t)$ se define como la diferencia entre la señal de respuesta con un punto de referencia ($e=r-y$). En el caso de estructuras el punto de referencia será de cero, es decir que se desea que la estructura permanezca estática ($e(t)=-y(t)$) (Honeywell, 2000).

$$F_c = K_p(-y) + K_i \int_0^t (-y) dt + K_d \frac{d}{dt}(-y) \quad (3.13a)$$

$$F_c = K_p \left[(-y) + \frac{1}{T_i} \int_0^t (-y) dt + T_d \frac{d}{dt} (-y) \right] \quad (3.13b)$$

El primer término únicamente es proporcional a la respuesta, en este caso el comando de control será tan grande como lo sea la respuesta. El valor de K_p se define como la ganancia proporcional y puede ser representado esquemáticamente con la figura 3.4. En esta gráfica, se establece la variable de control en función del error y la ganancia proporcional será la pendiente de esta función. Además, es posible establecer los límites del actuador como su capacidad máxima, U_{\max} y su capacidad mínima, U_{\min} . (Astrom y Hagglund, 1995).

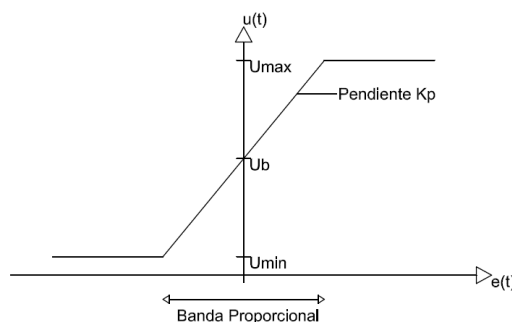


Figura 3.4.- Características de un controlador proporcional (Astrom y Hagglund 1995)

Para explicar la aportación de cada uno de los términos del control PID, es común analizar la respuesta de un sistema de un grado de libertad. En el ejemplo se establece un punto de referencia unitario en el esquema de lazo cerrado del sistema (Figura 3.5).

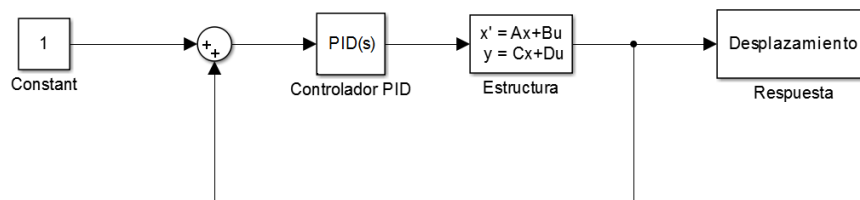


Figura 3.5.- Esquema de lazo cerrado con control PID.

Para investigar el efecto que tiene de K_p en el controlador se construyó el modelo mostrado en la Figura 3.5. Al variar K_p , el sistema se acercará al punto de referencia a medida que éste aumenta, pero nunca lo alcanzará (Figura 3.6). Las limitantes de la ganancia K_p , son que, al aumentar su valor incrementan tanto la amplitud como la frecuencia de oscilación.

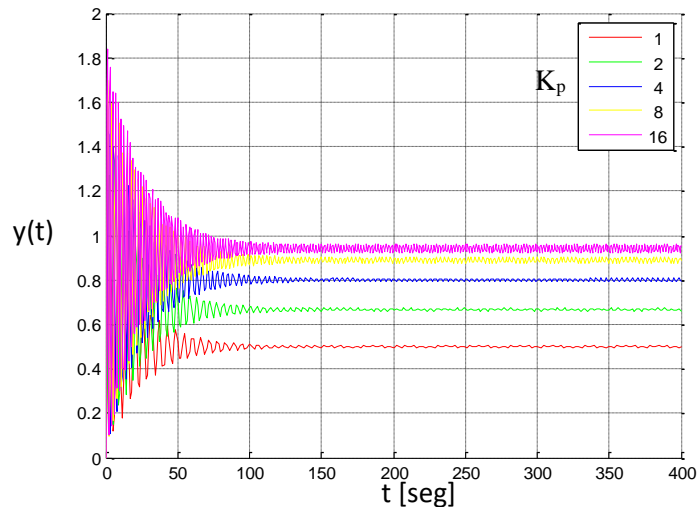


Figura 3.6.- Respuesta en lazo cerrado de un sistema de segundo orden variando la ganancia del control proporcional.

Como complemento para el control proporcional se utiliza la ganancia integral (K_i). Con ésta, el sistema podrá alcanzar el punto de referencia deseado. El significado de la integral es que se estará tomando en cuenta el error a lo largo del tiempo transcurrido. La ganancia de la integral también es posible expresarla en función del tiempo de integración (T_i), como en la ecuación 3.13b. En la figura 3.7 se observa que, para cualquier valor finito de T_i , el sistema se estabilizará en el punto de referencia. A menores valores de T_i , el sistema tardará menos tiempo en alcanzar el punto de referencia, pero comenzarán a incrementar las amplitudes de oscilación.

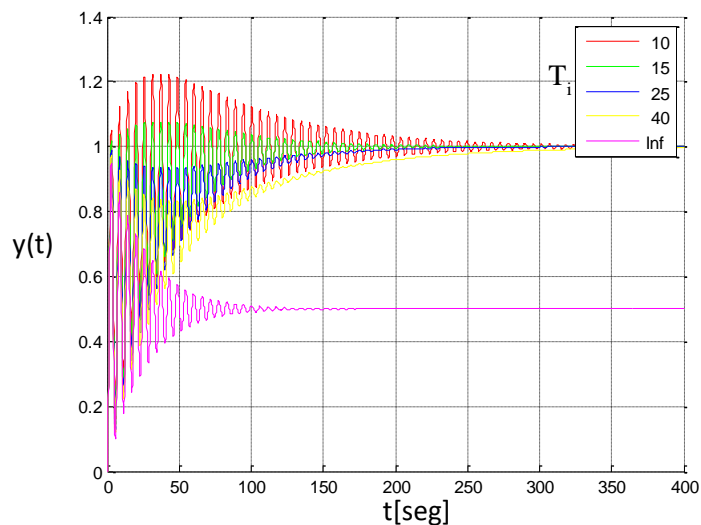


Figura 3.7.- Respuesta en lazo cerrado de un sistema de segundo orden, con ganancia proporcional $K_p=1$ variando el tiempo de Integración.

Como última aportación al controlador, se introduce el termino derivativo. Debido a que es un proceso dinámico, la fuerza de control puede tardar en afectar la respuesta del sistema. Es por lo anterior que, con una extrapolación tangencial o expansión de series de Taylor (ec. 3.14), es posible predecir la respuesta del sistema (Figura 3.8). La expansión Taylor de la respuesta en un tiempo $(t + T_d)$ se aproxima como la suma del error y su derivada por el tiempo de derivación T_d (ec. 3.14) (Astrom y Hagglund, 1995). En la Figura 3.9 es posible apreciar la aportación de utilizar una ganancia derivativa ($K_d = T_d * K_p$) en un controlador PID. Al ir incrementando esta ganancia, comenzaran a decrecer las oscilaciones en la curva de respuesta.

$$e(t + T_d) \approx e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.14)$$

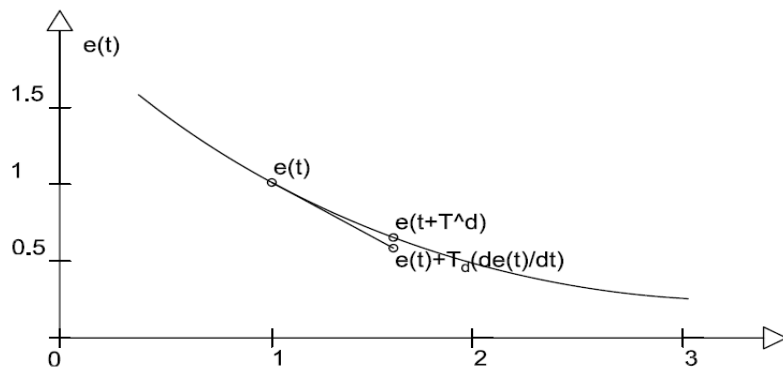


Figura 3.8.- Interpretación de la acción derivativa como control predictivo, en donde la predicción es obtenida por una extrapolación lineal (Astrom y Hagglund, 1995)

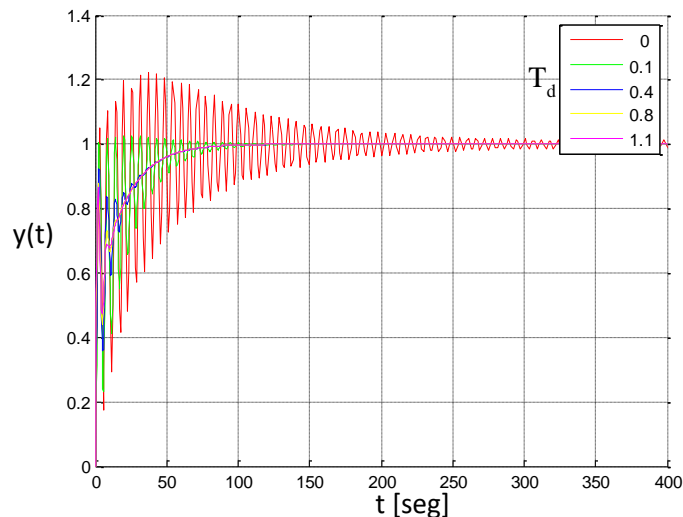


Figura 3.9.- Respuesta en lazo cerrado de un sistema de segundo orden, con ganancia proporcional $K_p=1$, tiempo de integración $T_i=10$, variando el tiempo de derivación.

Uno de los problemas del controlador PID es la correcta elección de las tres componentes (K_p , T_i , T_d). En la literatura se pueden encontrar varios métodos de selección para las tres ganancias, pero únicamente para sistemas de un solo grado de libertad. En el caso de este trabajo se estudian sistemas

con múltiples grados de libertad. Para seleccionar las tres ganancias, se recurrirá a los métodos de estabilidad para un sistema de control PID de la ecuación 2.4 (Thenozhi y Yu, 2014). El esquema de lazo cerrado utilizado con un registro sísmico aplicado para el control PID con el programa Simulink se muestra en la Figura 3.10

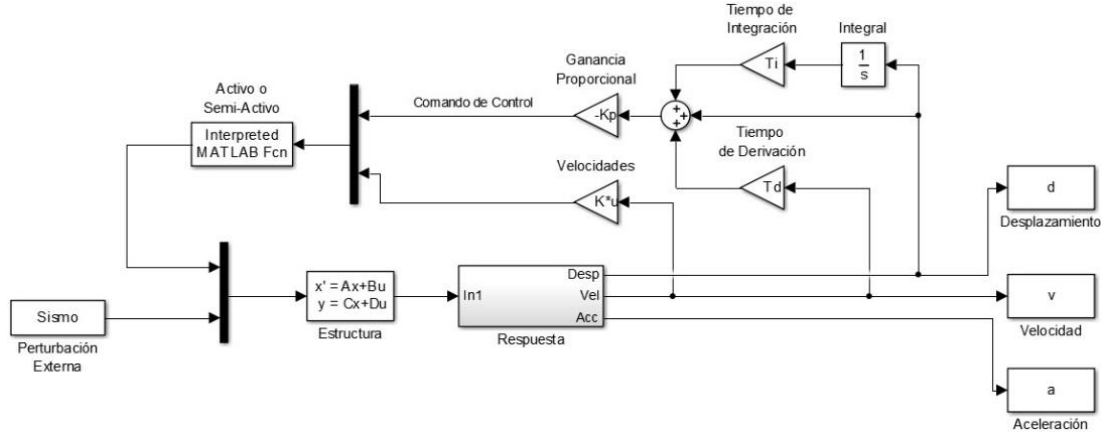


Figura 3.10.- Esquema de lazo cerrado de un controlador PID utilizado con el programa SimuLink

3.5 Control Activo o Semi-Activo en Cada Algoritmo

Como se había mencionado en el capítulo uno, la diferencia entre un control activo y uno semi-activo es la forma en que se aplica la fuerza de control. Después de haber obtenido la fuerza de control en cada algoritmo es necesario procesarla dependiendo si se elige un control activo o semi-activo. Para realizar el proceso de control semi-activo se deberá recordar que la fuerza únicamente se aplicará si va en el mismo sentido de la velocidad. Para esto se recurre a las condiciones expresadas en la ecuación 3.15 (adap. Kurata et al.1999).

$$F_c = \begin{cases} f_{dmax} * sign(v) & si \quad f_{com} * v > 0, \quad |f_{com}| > f_{max} \\ c_{max} * v & si \quad f_{com} * v > 0, \quad |f_{com} / v| > c_{max}, |f_{com}| \leq f_{max} \\ f_{com} & si \quad f_{com} * v > 0, \quad |f_{com} / v| \leq c_{max}, |f_{com}| \leq f_{max} \\ 0 & si \quad f_{com} * v \leq 0, \quad -- \end{cases} \quad (3.15)$$

En donde F_c es la fuerza de control, f_{dmax} la fuerza máxima del dispositivo, c_{max} es el amortiguamiento máximo del dispositivo, f_{com} es el comando de control de cada algoritmo y v es la velocidad del sistema.

Como se trata de un control semi-activo en la ecuación 3.15, primero se debe verificar que la velocidad y la fuerza van en el mismo sentido. Si esto ocurre ($f_{com} * v > 0$) se procede a determinar cuál es la fuerza aplicada. Si el comando de control (f_{com}) es mayor a la capacidad del dispositivo, se aplicará la fuerza máxima del dispositivo en el mismo sentido que la velocidad. Si el comando de control es menor que la fuerza máxima, entonces se revisa si el amortiguamiento sobrepasa su límite máximo ($|f_{com}/v| > c_{max}$). En caso afirmativo se aplica la fuerza correspondiente al coeficiente de amortiguamiento máximo por la velocidad, en contrario la fuerza aplicada será igual al comando de control.

Para calcular la fuerza con sistemas de control activo se debe recordar que no importa en qué dirección vaya la fuerza. Siempre habrá una posible fuerza para aplicar al sistema y quedará expresada de manera similar que en el control semi-activo en la ecuación 3.16.

$$F_c = \left\{ \begin{array}{ll} f_{dmax} * sign(v) & si \quad |f_{com}| > f_{max} \\ c_{max} * v & si \quad |f_{com} / v| > c_{max}, |f_{com}| \leq f_{max} \\ f_{com} & si \quad |f_{com} / v| \leq c_{max}, |f_{com}| \leq f_{max} \end{array} \right\} \quad (3.16)$$

Capítulo 4.- Modelos en estudio

Como parte de los objetivos de este trabajo, se comparó el comportamiento de cada algoritmo de control en estructuras de distintas alturas. Los modelos a estudiar que se proponen son los marcos de acero del proyecto SAC. Este proyecto fue desarrollado en 1994 tras el sismo de Northridge para desarrollar nuevos enfoques de diseño, técnicas de reparación y minimización del daño en estructuras de acero (SAC Project, 1994). Los marcos utilizados son de 3, 9 y 20 niveles, los cuales representan estructuras típicas de baja, mediana y gran altura respectivamente. Otra manera de catalogar a los edificios será como estructura rígida, medianamente rígida o flexible respectivamente. Los datos de cada uno de los marcos fueron obtenidos de Ohtori et al. (2004)

4.1 Edificio de Tres Niveles

La estructura de tres Niveles (Figura 4.1) con 3.96 m de altura cada uno, son marcos perimetrales momento-resistentes con perfiles W de grado 50 en columnas y grado 36 en vigas. En la dirección corta (N-S) tiene cuatro crujiás con claros de 9.1 m, en la otra dirección son seis crujiás con la misma separación (E-O). El apoyo de las columnas en la base, se considera como empotramiento perfecto. Las vigas de la crujiá extrema derecha tienen conexiones a cortante en ambos lados. Las masas se consideran como masas concentradas, con un valor de 9.57×10^5 kg para los primeros dos niveles y 1.04×10^6 kg para el tercer nivel. Estas masas consideran el peso de los marcos, losas de entrepiso, acabados, instalaciones, techumbre y un pent-house en la azotea.

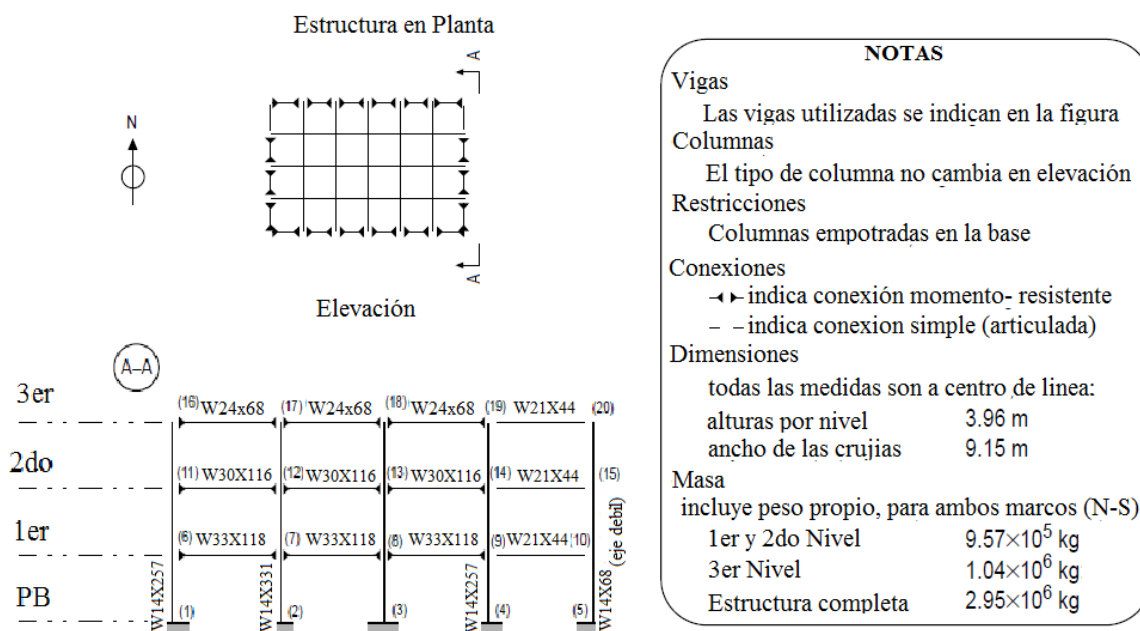


Figura 4.1.- Estructura en estudio de tres niveles (adap. Ohtori et al., 2004)

4.2 Edificio de Nueve Niveles

El edificio en estudio de nueve niveles (Figura 4.2) tiene una planta cuadrada con marcos momento resistentes perimetrales de cinco crujeías por lado, separadas a 9.15 m cada una. Esta estructura tiene un sótano (B-1) de 3.65 m de alto, la planta baja mide 5.49 m y todos los niveles restantes tienen 3.96 m de altura. Las columnas son de acero grado 50, con las mismas secciones por planta y varían en altura. El cambio de sección de las columnas se encuentra en los niveles uno, tres, cinco y siete con conexiones a 1.83m por encima del entrepiso. Las columnas están articuladas en la base; además, se considera que la estructura tiene apoyo lateral en el nivel de planta baja. Las vigas son de acero grado 36 con conexiones a momento, a excepción de las vigas en la crujeía extrema derecha que tienen conexiones articuladas del lado derecho.

Las masas consideran el peso de los marcos, las losas de entrepiso, acabados, instalaciones, techumbre y un pent-house en la azotea. El nivel de planta baja tiene una masa de 9.65×10^5 kg, el primer nivel 1.01×10^6 kg, la masa de los subsecuentes hasta el piso ocho es de 9.89×10^5 kg y el último nivel suma 1.07×10^6 kg a la masa total.

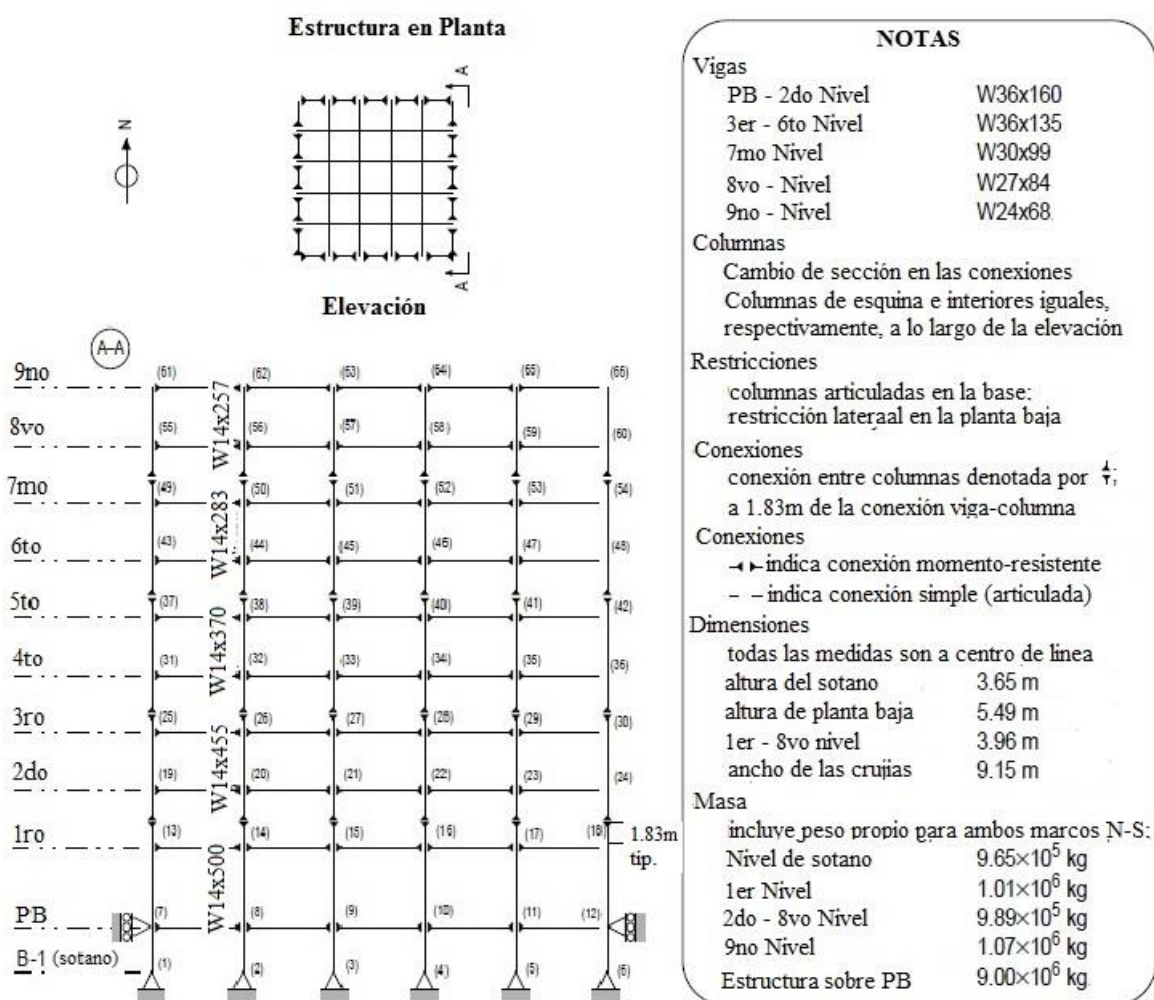


Figura 4.2.- Estructura en estudio de nueve niveles (adap. Ohtori et al., 2004)

4.3 Edificio de 20 Niveles

La última estructura que se modelará del proyecto SAC es un edificio con marcos de acero de 20 niveles (Figura 4.3). El edificio tiene una planta de marcos perimetrales momento-resistentes con cinco crujías en la dirección N-S y seis crujías en la dirección E-O. Cada claro tiene 6.10m de largo, la altura por nivel es de 3.65m para los sótanos, 5.49m para planta baja y 3.96m como altura típica de entrepiso.

Las columnas utilizadas son perfiles laminados de grado 50. Todas las secciones en columnas interiores son perfiles W iguales en planta y hay un cambio de sección en los niveles; 4,10,13,16 y 18. Las columnas de extrema derecha son cajones de 15 x 15 con espesor “t” que cambia en los niveles; 1,4,13 y 18. El cambio de sección o la conexión entre columnas se localiza a 1.83m sobre el nivel correspondiente. Las columnas están soportadas por articulaciones en la base. Además, se considera que los muros de cimentación y el suelo dan soporte lateral a la estructura en el nivel de planta baja.

Todas las vigas utilizadas son perfiles W grado 36 constantes en planta y varían en la altura del edificio. El cambio de perfiles en vigas se da en los niveles 5, 11, 14, 17, 19 y 20. Todas las vigas que se localizan por encima del nivel del terreno tienen conexiones a momento. A diferencia de las vigas en los sótanos, las cuales tienen conexiones simples a cortante.

Al igual que los edificios de tres y nueve niveles, la masa del edificio de 20 niveles considera componentes como: marcos, losas, acabados, instalaciones, techumbre y el pent-house. En la planta baja el valor de la masa es de 5.32×10^5 kg, el primer nivel 5.63×10^5 kg, del nivel dos al 19 la masa es de 5.52×10^5 kg y para la azotea la masa es de 5.84×10^5 kg.

4.4 Consideraciones de Modelado

El sistema de piso de los tres edificios está compuesto por las vigas actuando en conjunto con la losa de entrepiso. De acuerdo con las suposiciones de la práctica común se toman en cuenta diafragmas rígidos en el plano horizontal. En los modelos utilizados se supone que el diafragma rígido distribuye la mitad de la masa a cada marco N-S (Figura 4.4), por lo tanto, cada uno resiste la mitad de la fuerza sísmica correspondiente a la estructura entera.

Para el modelado analítico es necesario obtener las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento para cada una de las estructuras. En la matriz de rigideces solo se considera la aportación de los dos marcos en dirección N-S para cada edificio. Dentro de la matriz de rigideces local de cada elemento se toma en cuenta el tipo de conexiones entre vigas y columnas. Para el caso de la matriz de masa únicamente se conoce el valor de las masas concentradas de cada nivel, entonces se obtienen las correspondientes matrices cuadradas con “N x N” niveles. Por lo tanto, es necesario que la matriz de rigideces global calculada sea del mismo orden.

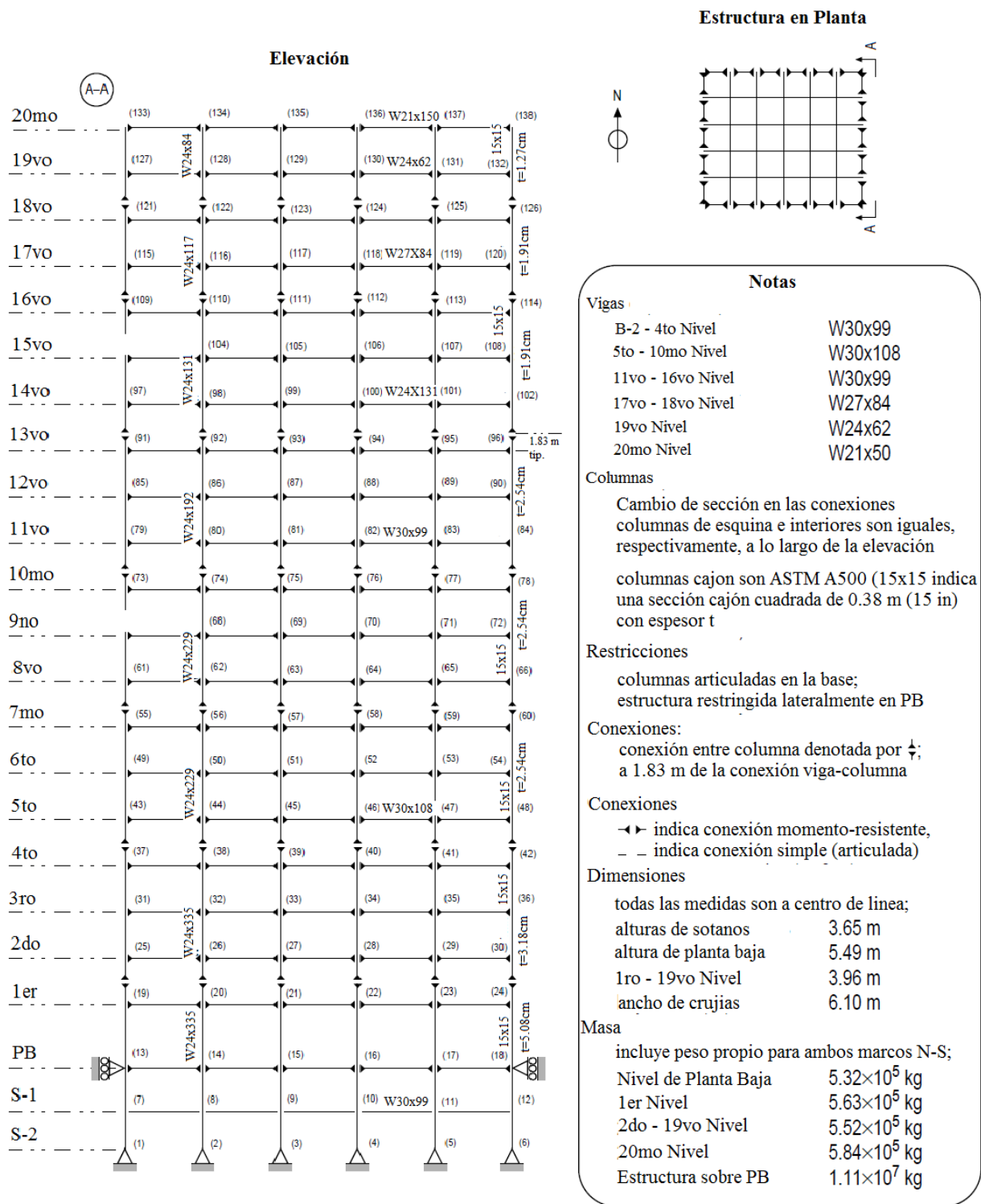


Figura 4.3.- Estructura en estudio de 20 niveles (adap. Ohtori et al., 2004)

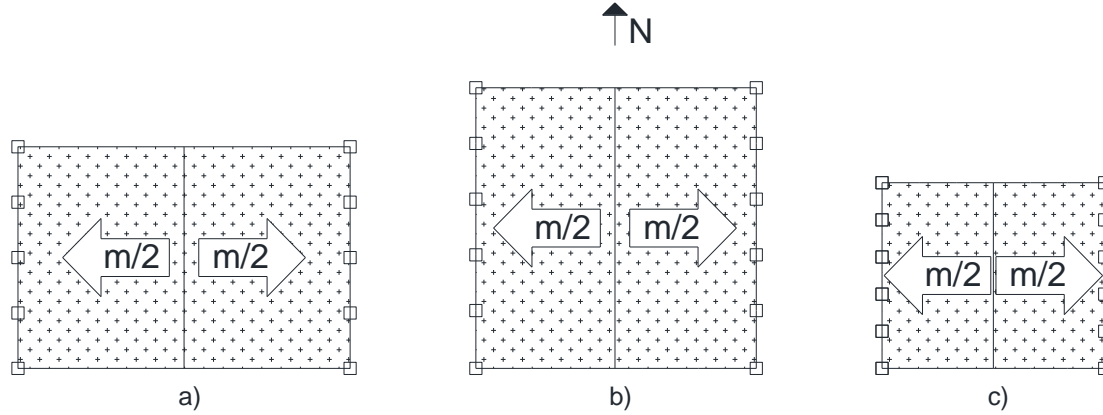


Figura 4.4.- Distribución de masa a cada marco N-S

En la matriz de rigideces de cada estructura se toman en cuenta tres grados de libertad por nodo (horizontal, vertical y rotación). Esta matriz no será compatible con la matriz de masas, por lo tanto, se decidió realizar una condensación estática (ec. 4.1 y 4.2). La condensación estática sirve para eliminar los GDL que no tienen una masa asignada; sin embargo, todos los GDL se toman en cuenta en el análisis (Chopra, 2014). En este caso los grados de libertad con masa asignada serán los desplazamientos horizontales y se obtiene su matriz de rigidez equivalente (ec.4.2). Con esta matriz resultante, considerando el diafragma rígido, se suma la aportación de todos los grados de libertad horizontales por nivel para obtener una matriz de rigideces de $N \times N$.

$$\begin{bmatrix} m_{tt} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_t \\ \ddot{q}_o \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{tt} & k_{to} \\ k_{ot} & k_{oo} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_t \\ u_o \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_t(t) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\hat{k}_{tt} = k_{tt} - k_{ot}^T k_{oo}^{-1} k_{ot} \quad (4.2)$$

Si se tiene, tanto la matriz de rigideces como la de masas es posible calcular las frecuencias o periodos de los tres edificios. Para el edificio de tres niveles se obtienen las tres primeras frecuencias de vibrar con valores de **0.9915**, 3.0593 y 5.8279 Hz (**1.0086**, 0.3269 y 0.1716 seg) . Las cinco primeras frecuencias del edificio de nueve niveles son; **0.4329**, 1.1518, 2.0064, 3.0449 y 4.1926 Hz (**2.3100**, 0.8682, 0.4984, 0.3284 y 0.2385 seg). Por último, los valores del edificio de 20 niveles para las siete primeras frecuencias son: **0.2634**, 0.7606, 1.3104, 1.8510, 2.4390, 3.0559 y 3.7148 Hz (**3.7965**, 1.3148, 0.7631, 0.5402, 0.4100, 0.3272 y 0.2692 seg). De acuerdo con los periodos calculados el marco de tres niveles será una estructura rígida, el de nueve niveles es medianamente rígida y el de 20 niveles se considera como flexible. Todas las frecuencias calculadas en este trabajo se comparan con los valores calculados por Ohtori et al., 2004. Esta comparación se hace con el fin de tener la certeza del correcto modelado analítico de las estructuras. Los resultados de las frecuencias en este trabajo son muy similares a las del trabajo previo. Aunque, en este trabajo se hicieron simplificaciones en el modelado como la condensación estática.

Para el amortiguamiento de cada estructura se calculó una matriz de coeficientes de amortiguamiento modal (ec. 4.3). El n-esimo término de esta ecuación es la aportación del modo “n”, con su fracción de amortiguamiento correspondiente, a la matriz de amortiguamiento del sistema (Chopra, 2014). Por lo tanto, se tienen que proponer fracciones de amortiguamiento para cada modo (ϕ_n) considerado. La fracción de amortiguamiento propuesta fue de 2.5% para el primer modo de vibrar y disminuye en modos superiores. Se utiliza amortiguamiento de 2.5% ya que es recomendado para estructuras de

acero con conexiones soldadas, en donde el esfuerzo actuante sea menor que la mitad del esfuerzo de fluencia (Chopra, 2014).

$$c = m \left(\sum_{n=1}^J \frac{2\zeta_n \omega}{M_n} \phi_n \phi_n^T \right) m \quad (4.3)$$

Como dispositivos de control se adaptó un actuador colocado con contraviento tipo Chevrón en cada nivel y en cada marco N-S como el arreglo mostrado en la Figura 4.5. En las tres estructuras del proyecto SAC se consideran las limitantes de los dispositivos activos o semi-activos: de 1000 kN para la fuerza de amortiguamiento y 200kN/mm para el máximo coeficiente de amortiguamiento.

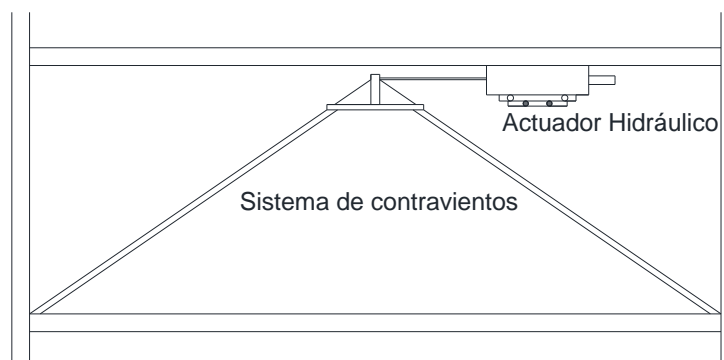


Figura 4.5.- Esquema de un sistema de contravientos activos (adap. Cheng, 2008)

Los contravientos de cada nivel se diseñaron bajo las especificaciones del AISC para satisfacer la capacidad máxima del actuador (1000kN). Aplicando esta fuerza en el arreglo de contravientos, se calculó la fuerza correspondiente a cada diagonal. Después, se propone una sección tipo cajón cuadrangular para cada uno y se revisa que cumpla los estados límites a tensión y a compresión. Los perfiles propuestos y aceptados para todos los contravientos se resumen en la Tabla 4.2. En esta misma tabla se incluyen los periodos fundamentales de cada estructura incluyéndole todos los contravientos propuestos.

Tabla 4.2.- Contravientos utilizados en el sistema de control de las estructuras SAC.

Estructura	Ubicación de contraviento	Sección del contraviento	Periodo fundamental con contravientos
Edificio Tres Niveles	Planta Baja	HSS 6x6x3/8	0.5864 s
	Niveles 1-2	HSS 6x6x3/8	
Edificio Nueve Niveles	Planta Baja	HSS 7x7x3/8	1.0762 s
	Niveles 1-8	HSS 6x6x3/8	
Edificio 20 Niveles	Planta Baja	HSS 8x8x5/16	1.6645 s
	Niveles 1-19	HSS 6x6x3/8	

Capítulo 5.- Método de Evaluación

5.1 Registros Sísmicos utilizados

Para evaluar cada sistema de control en las diferentes estructuras se propone utilizar distintos registros de sismos históricos. Cada registro fue escalado para que tuvieran velocidades máximas de 0.25 m/s y 0.50 m/s, con el fin de que las respuestas fueran comparables. Para escalar los registros primero se integró y filtro la historia de aceleraciones, con lo que se obtuvo una historia de velocidades. Después con la velocidad máxima de cada registro se calculó un escalar que, al multiplicarlo por todo el registro la nueva velocidad máxima fuera de 0.25 m/s ó 0.50 m/s. Los registros sísmicos seleccionados se describen a continuación y se muestran escalados en las figuras 5.1 y 5.4. Además, sus espectros de pseudo-aceleración se presentan en las figuras 5.2 y 5.5 escalados a 0.25 y 0.50 m/s respectivamente. Los espectros de pseudo-velocidad para cada registro se muestran en las figuras 5.3 y 5.6 escalados a 0.25 y 0.5 m/s respectivamente. Cada espectro se calculó utilizando un porcentaje de amortiguamiento crítico del 2.5%, que corresponde al amortiguamiento supuesto en las estructuras.

a) Kobe: El registro utilizado pertenece a la componente N-S en la estación de la agencia meteorológica japonesa en la ciudad de Kobe. Este sismo ocurrió en Hyogo-ken Nanbu el 17 de enero de 1995 con magnitud de 7.2, duración de 49.98 seg, aceleración y velocidad máxima de 5.79 m/s^2 y 0.91 m/s respectivamente (H. Sotero, 1997).

b) México SCT: Fue uno de los mayores sismos que afectaron la ciudad de México y ocurrió el 19 de septiembre de 1985. Tuvo una magnitud de 8.1 y su epicentro en las costas de Michoacán. El registro utilizado es en dirección N90°E de la estación en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de la ciudad de México. La duración de este registro es de 183.51 seg con una aceleración máxima es 1.62 m/s^2 y máxima velocidad de 0.58 m/s (IINGEN UNAM, 2014).

c) Northridge: este sismo ocurrió el 17 de enero de 1994 con magnitud de 6.7 y epicentro en el Valle de San Fernando, Los Ángeles California. El acelerograma se registró en la dirección N90°E de la estación ubicada en el ayuntamiento de la ciudad de Santa Mónica. La duración de este registro es 9.98 seg, aceleración máxima de 7.38 m/s^2 y máxima velocidad de 0.41 m/s (H. Sotero, 1997).

d) El Centro: sismo ocurrido el 18 de mayo de 1940 con magnitud de 6.9 en Imperial Valley, al sudeste de California. El acelerograma se registró en la estación de la Universidad de Berkley, California. La dirección del registro es a 270°, con aceleración máxima de 3.42 m/s^2 , máxima velocidad de 0.28 m/s y tiene duración de 53.74 seg (H. Sotero, 1997).

e) Taft: sismo ocurrido el 21 de julio de 1952 con magnitud de 7.3, en el condado de Kern, Estados Unidos. El acelerograma utilizado pertenece a la estación en la Universidad de Berkley, California, su duración es de 54.38 seg, aceleración máxima de 1.76 m/s^2 y máxima velocidad de 0.20 m/s (H. Sotero, 1997).

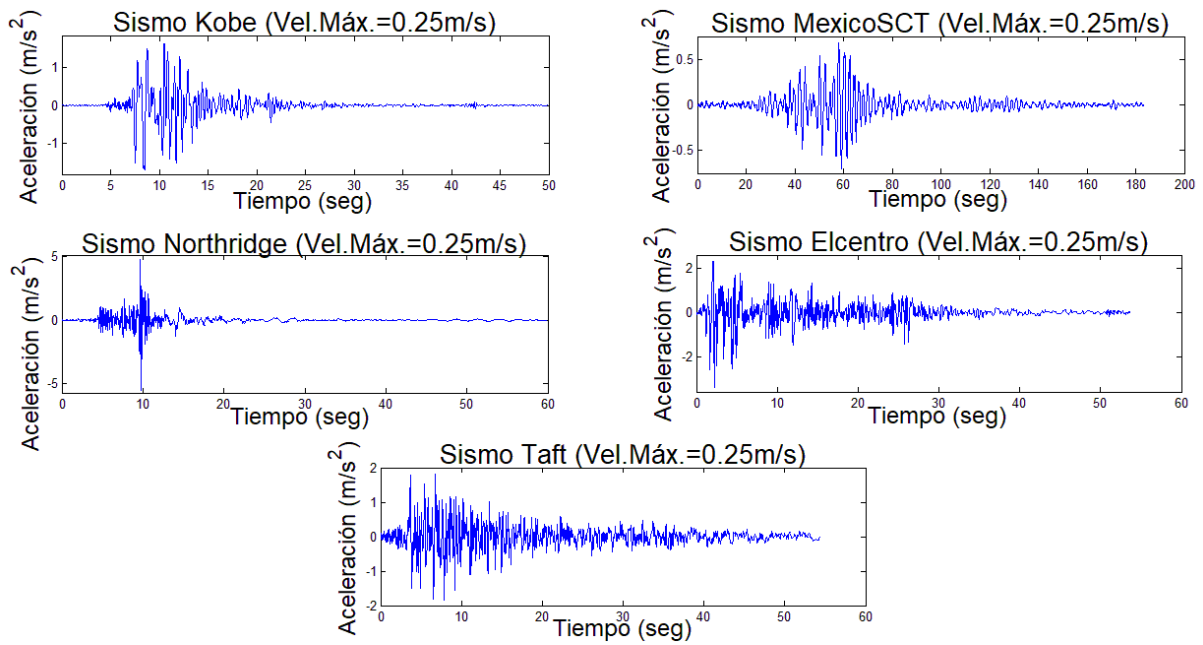


Figura 5.1.- Acelerogramas históricos escalados con velocidad máxima de 0.25 m/s.

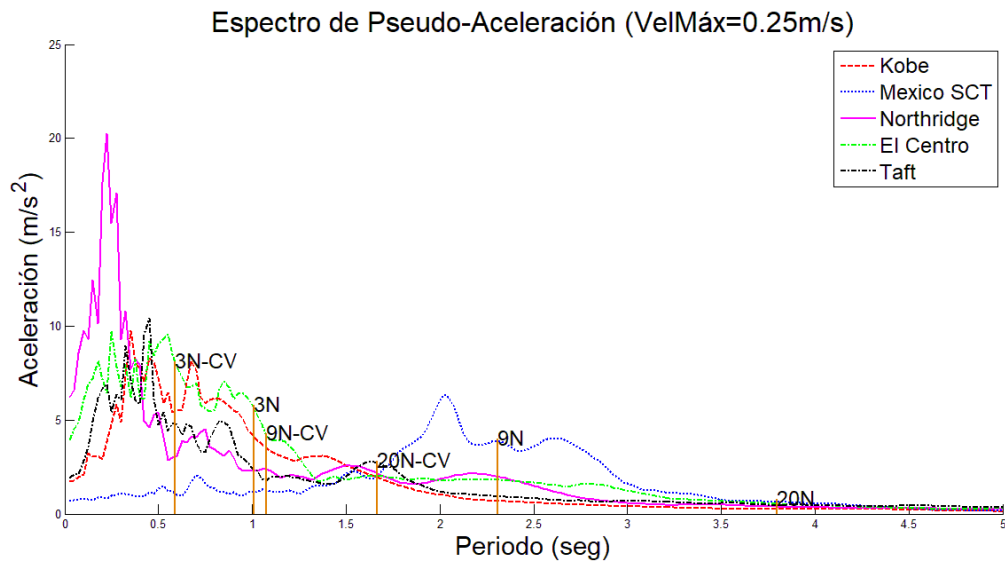


Figura 5.2.- Espectros de aceleración escalados con velocidad máxima de 0.25 m/s y $\xi=2\%$.

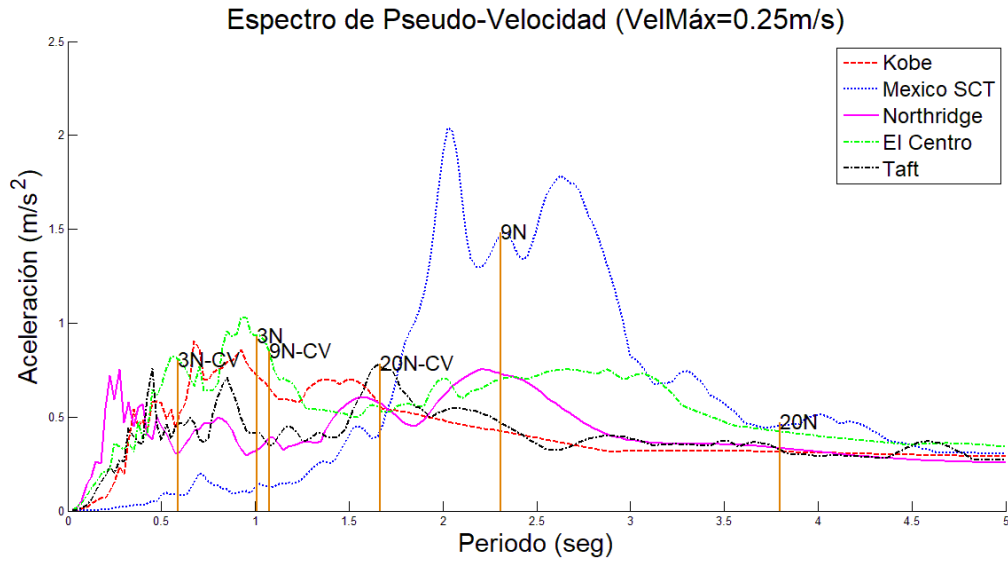


Figura 5.3.- Espectros de velocidad escalados con velocidad máxima de 0.25 m/s y $\xi=2\%$.

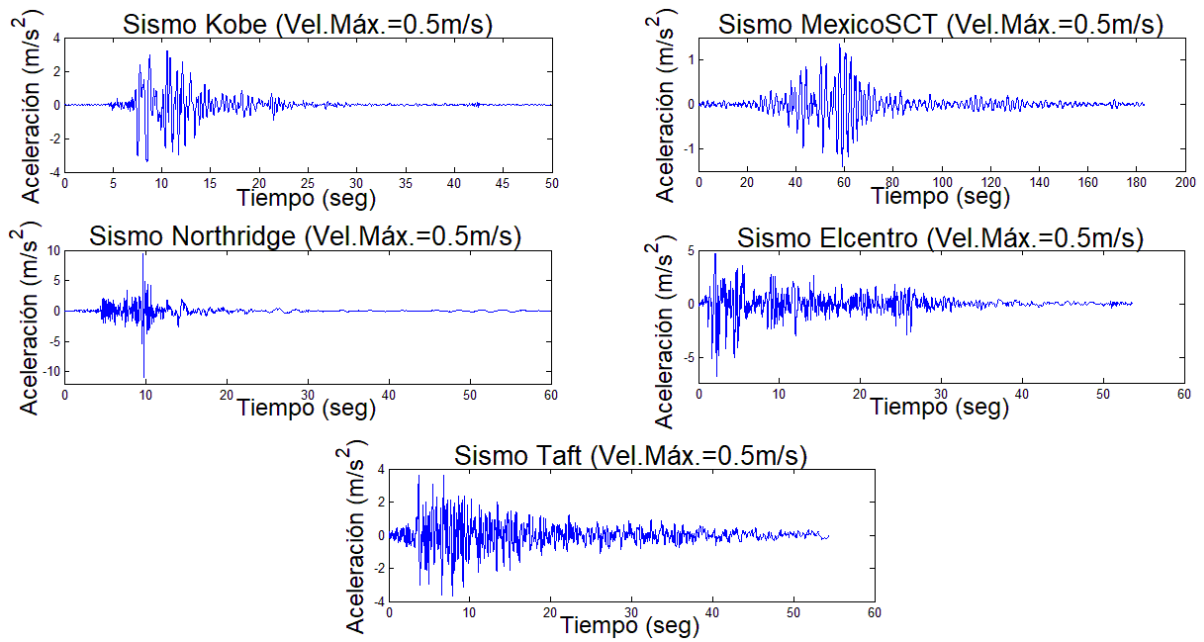


Figura 5.4.- Acelerogramas históricos escalados con velocidad máxima de 0.5 m/s.

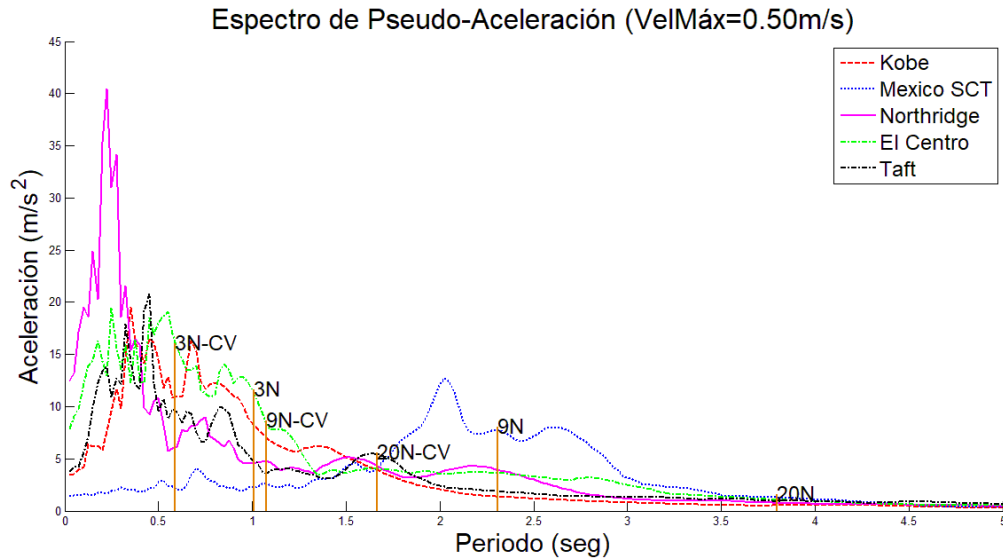


Figura 5.5.- Espectros de aceleración escalados con velocidad máxima de 0.5 m/s y $\xi=2\%$.

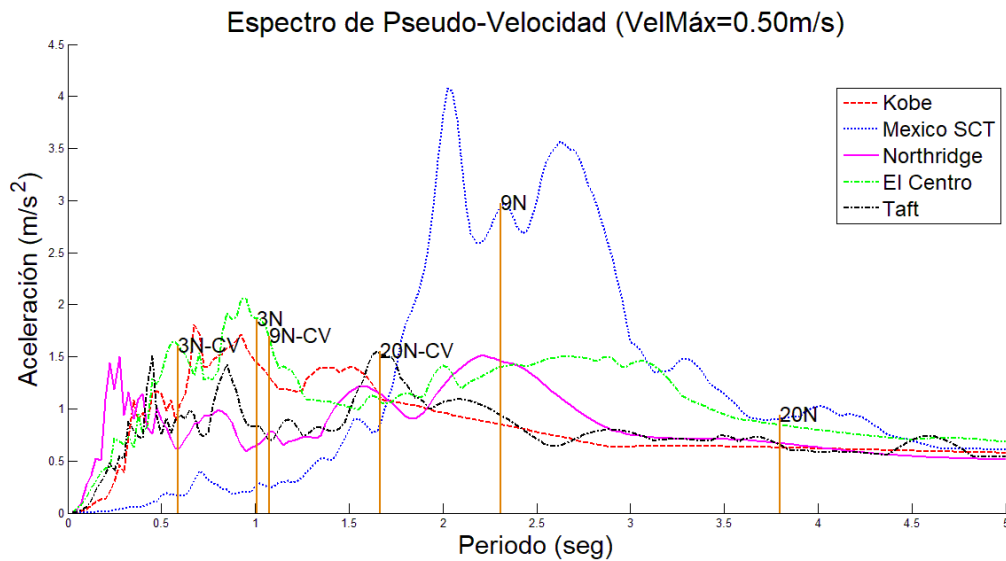


Figura 5.6.- Espectros de velocidad escalados con velocidad máxima de 0.25 m/s y $\xi=2\%$.

5.2 Índices de Desempeño

Determinadas las estructuras y los algoritmos de control, es necesario comparar las respuestas de cada sistema. Comparar gráficas historia de tiempo contra respuesta del sistema resulta poco práctico; por lo tanto, es necesario calcular índices de desempeño. Los índices que se proponen en esta tesis, están basados en los que utilizan Ohtori y colaboradores en su trabajo del 2004, así como el trabajo de Jansen y Dyke en el 2000.

Con los distintos índices (J_i), se podrá evaluar la reducción de la respuesta y la fuerza aplicada al sistema. El primero de ellos (ec.5.1) relaciona la distorsión máxima absoluta de cada entrepiso, entre la distorsión correspondiente del sistema no controlado. El segundo índice (ec.5.2), evalúa la aceleración máxima por entrepiso entre su valor correspondiente del sistema sin control. El tercer índice (ec.5.3), valora el desempeño con base en el máximo cortante basal de la estructura con y sin control.

$$J1_i = \left\{ \frac{\max_t \left(\frac{d_{ci}(t)}{h_i} \right)}{\max_t \left(\frac{d_i(t)}{h_i} \right)} \right\} \quad (5.1)$$

$$J2_i = \left\{ \frac{\max_t (|\ddot{x}_{ci}(t)|)}{\max_t (|\ddot{x}_i(t)|)} \right\} \quad (5.2)$$

$$J3 = \left\{ \frac{\max_t \left(\sum_i m_i \ddot{x}_{ci}(t) \right)}{\max_t \left(\sum_i m_i \ddot{x}_i(t) \right)} \right\} \quad (5.3)$$

En donde, $d_{ci}(t)$, $d_i(t)$ y h_i son los desplazamientos controlados, no controlados y la altura del edificio respectivamente del entrepiso “i”. Los términos $\ddot{x}_{ci}(t)$ y $\ddot{x}_i(t)$ son la aceleración del nivel “i” con y sin control respectivamente. Además, m_i , son las masas concentradas de cada entrepiso.

Los tres primeros índices evaluarán las respuestas máximas de cada estructura. Sin embargo, son necesarios valores que den información de la respuesta a lo largo de todo el tiempo de excitación. Con este propósito se calcularán los siguientes tres índices. En el índice cuatro se relaciona la norma de la distorsión de cada entrepiso con y sin control. El quinto índice, se determina con la norma de aceleración del marco controlado dividida entre la norma de aceleración sin control. De forma similar a los anteriores, el índice J6 evalúa la norma del cortante en la base con y sin control. Para atribuir un buen comportamiento a cada controlador, se esperan valores menores a la unidad en los índices hasta ahora mencionados.

$$J4_i = \left\{ \frac{\left(\frac{\|d_{ci}(t)\|}{h_i} \right)}{\left(\frac{\|d_i(t)\|}{h_i} \right)} \right\} \quad (5.4)$$

$$J5_i = \left\{ \frac{\|\ddot{x}_{ci}(t)\|}{\|\ddot{x}_i(t)\|} \right\} \quad (5.5)$$

$$J6 = \left\{ \frac{\left\| \sum_i m_i \ddot{x}_{ci}(t) \right\|}{\left\| \sum_i m_i \ddot{x}_i(t) \right\|} \right\} \quad (5.6)$$

En donde $\|y(t)\|$, es la norma de la respuesta a evaluar y se define como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de todos los puntos en la historia de tiempo.

Los últimos dos parámetros evaluarán el desempeño de los dispositivos. Dichos parámetros se calculan con la máxima fuerza aplicada por los dispositivos (ec. 5.7) y su raíz media cuadrática (rms) (ec. 5.7) respectivamente. Cada uno se normaliza con la fuerza máxima de los dispositivos ($F_{d\max}$), por lo tanto, un valor unitario denota que la capacidad máxima del dispositivo fue alcanzada.

$$J7_{di} = \left\{ \frac{\max_t(f_{di}(t))}{F_{d\max}} \right\} \quad (5.7)$$

$$J8_{di} = \left\{ \frac{rms(f_{di}(t))}{F_{d\max}} \right\} \quad (5.8)$$

Después de calcular la respuesta de cada estructura con los distintos algoritmos de control, se evaluarán los ocho índices propuestos. Al analizar todos los índices, se hará una propuesta para la selección del algoritmo ideal para cada tipo de marco en función de su altura o rigidez lateral. Tanto para control activo como semi-activo.

Capítulo 6.- Análisis de Resultados

6.1 Parámetros seleccionados para cada algoritmo

Como se mencionó en el capítulo 3, cada algoritmo necesita de ciertos parámetros para calcular las fuerzas de control que se aplicarán a la estructura. En los párrafos siguientes se detallará el valor que se le asignó a cada parámetro de los tres algoritmos.

6.1.1 PID

El primer algoritmo es el PID, en el cual se deben proponer tres ganancias; la proporcional (K_p), la integral ($K_i=K_p/T_i$) y la derivada ($K_d=K_p \cdot T_d$). Para la calibración de dichos parámetros se recurrió a las condiciones de estabilidad de una estructura con control PID, mostradas en la ecuación 2.4 (Yu y Thenozhi, 2014).

Para las tres estructuras en estudio, las ganancias proporcionales, el tiempo de derivación (T_d) y el de integración, se calcularon por cada dispositivo utilizado. Como se observa en las ecuaciones 2.4, las ganancias dependen del registro aplicado ($f_s = M\ddot{x}_g$) y de la respuesta de la estructura ($f_s = Kx$). En las tablas 6.1 a 6.6 se resume para cada excitación el promedio de los parámetros K_p , T_d y T_i , de todos los dispositivos por estructura, para controles semi-activos y activos. Al observar los resultados de estas tablas el coeficiente de variación no sobrepasa del 6.7 %, por lo tanto, no hay una variación considerable de las ganancias con respecto a los diez registros. Es decir, que con estos resultados se podría ajustar una ganancia por estructura para cuando no se tenga algún registro sísmico previo.

Tabla 6.1.- Promedio de las ganancias por registro, del marco de tres niveles en control Semi-Activo

Escala del registro	Registro	K_p	T_d	T_i
0.5 m/s	Kobe	342431	1.0255	0.7438
	México SCT	317273	1.0453	0.7721
	Northridge	379279	0.965	0.7171
	El Centro	361997	0.9983	0.7274
	Taft	340891	1.019	0.7477
0.25 m/s	Kobe	326289	1.0395	0.7612
	México SCT	314003	1.05	0.7754
	Northridge	344801	1.0067	0.7462
	El Centro	335581	1.0282	0.7519
	Taft	325731	1.0358	0.763
	Media	338828	1.0213	0.7506
	Desv. Std	20128	0.0257	0.0185
	C.V.(%)	5.9405	2.5119	2.4645

Tabla 6.2.- Promedio de las ganancias por registro, del marco de tres niveles en control Activo

Escala del registro	Registro	K_p	T_d	T_i
0.5 m/s	Kobe	342320	1.0255	0.7439
	México SCT	317275	1.0453	0.7721
	Northridge	379930	0.9681	0.7154
	El Centro	362268	0.9971	0.7275
	Taft	340930	1.0192	0.7476
0.25 m/s	Kobe	326316	1.0389	0.7613
	México SCT	314004	1.05	0.7754
	Northridge	345034	1.0069	0.7459
	El Centro	336127	1.0234	0.7526
	Taft	325820	1.035	0.7631
	Media	339002	1.0209	0.7505
	Desv. Std	20296	0.0248	0.0189
	C.V.(%)	5.9871	2.4314	2.5128

Tabla 6.3.- Promedio de las ganancias por registro, del marco de nueve niveles en control Semi-Activo

Escala del registro	Registro	Kp	Td	Ti
0.5 m/s	Kobe	336571	1.0396	0.8144
	México SCT	313796	1.0642	0.8438
	Northridge	372004	0.9853	0.7798
	El Centro	351301	1.0188	0.7987
	Taft	333985	1.0366	0.8193
0.25 m/s	Kobe	321257	1.0567	0.8336
	México SCT	310008	1.0698	0.8486
	Northridge	338570	1.0276	0.8148
	El Centro	328168	1.0448	0.8259
	Taft	320184	1.0559	0.8356
	Media	332584	1.0399	0.8215
	Desv. Std	18625	0.0250	0.0210
	C.V.(%)	5.6002	2.4062	2.5520

Tabla 6.4.- Promedio de las ganancias por registro, del marco de nueve niveles en control Activo

Escala del registro	Registro	Kp	Td	Ti
0.5 m/s	Kobe	337277	1.0398	0.8133
	México SCT	313821	1.0643	0.8437
	Northridge	372643	0.9891	0.7779
	El Centro	351149	1.0192	0.7988
	Taft	334362	1.0365	0.8187
0.25 m/s	Kobe	321434	1.0572	0.8332
	México SCT	310020	1.0698	0.8486
	Northridge	339485	1.0281	0.8133
	El Centro	328412	1.0454	0.8254
	Taft	320298	1.0554	0.8355
	Media	332890	1.0405	0.8208
	Desv. Std	18783	0.0241	0.0214
	C.V.(%)	5.6423	2.3137	2.6096

Tabla 6.5.- Promedio de las ganancias por registro, del marco de 20 niveles en control Semi-Activo

Escala del registro	Rgistro	Kp	Td	Ti
0.5 m/s	Kobe	145284	1.1633	0.7996
	México SCT	135407	1.2032	0.8259
	Northridge	165220	1.0823	0.7562
	El Centro	152773	1.1346	0.7815
	Taft	146053	1.159	0.798
0.25 m/s	Kobe	137576	1.1858	0.822
	México SCT	132408	1.2097	0.8361
	Northridge	147335	1.14	0.7983
	El Centro	141247	1.1652	0.8135
	Taft	137756	1.1846	0.8216
	Media	144106	1.1628	0.8053
	Desv. Std	9662	0.0375	0.0238
	C.V.(%)	6.7047	3.2245	2.9552

Tabla 6.6.- Promedio de las ganancias por registro, del marco de 20 niveles en control Activo

Escala del registro	Registro	Kp	Td	Ti
0.5 m/s	Kobe	146589	1.167	0.7942
	México SCT	137459	1.2112	0.8162
	Northridge	166940	1.0823	0.7512
	El Centro	154855	1.1256	0.777
	Taft	147754	1.1617	0.7915
0.25 m/s	Kobe	138861	1.1889	0.8164
	México SCT	133916	1.2121	0.8295
	Northridge	149577	1.1513	0.788
	El Centro	142585	1.1692	0.8077
	Taft	139518	1.1885	0.8141
	Media	145805	1.1658	0.7986
	Desv. Std	9754	0.0396	0.0231
	C.V.(%)	6.6901	3.3931	2.8919

6.1.2 LQG y LQR

Para el algoritmo LQG es necesario definir cuatro parámetros, (Q, R, W y V). En este trabajo la prioridad es la reducción de la respuesta, por lo tanto, se necesitarán valores grandes de Q y valores pequeños de R. En realidad no existen reglas para definir que tan grandes o pequeños deben ser estos valores ya que depende de la experiencia del diseñador y de los objetivos de control. Por lo tanto,

para definir Q y R se toma como referencia el trabajo de Ohtori y colaboradores del 2004. La matriz Q de $n \times n$ ($n = \#$ niveles) se define con valores en la diagonal de 1×10^9 . La matriz R será del mismo orden, pero con valores en la diagonal de 0.0625. Las cantidades en estos parámetros se traducen en que se dará mayor importancia a la reducción de la respuesta y no tanto al ahorro de energía. Estos valores considerados grandes para Q y pequeños para R dependen de las unidades que se utilicen en el algoritmo de control, en este trabajo se utilizaron kgf, m y seg.

Para definir las matrices de covarianza en los ruidos de entrada (W) y de los ruidos de salida (V), se hicieron algunas simulaciones con diferentes valores de ellos y se observó lo siguiente: se recomiendan valores entre 0 y 1. La aportación de estos valores al controlador no dependerá de que tan pequeños sean, sino de la diferencia que haya entre los dos. Siempre teniendo en cuenta que W debe ser mayor que V. Con base en la menor respuesta obtenida se decidió que $W = 50V$, en donde V se define como la matriz identidad $I \times 10^{-2}$.

Para el último algoritmo, que es el LQR es necesario definir los valores del regulador Q y R. Para evitar más variables en el problema, se definieron dichos valores iguales que en el controlador LQG. Con estas consideraciones, los resultados de cada marco con el algoritmo LQG no tendrán mayor ventaja sobre el LQR más que la aportación de los ruidos de entrada y salida.

6.2 Resultados

Una vez definidos todos los parámetros necesarios para cada algoritmo, se hicieron las simulaciones de cada estructura con cada controlador tanto activo como semi-activo. A cada estructura se le aplicaron diez registros, los cinco mencionados en el capítulo 5, escalados con las velocidades máximas a 0.25 y 0.5 m/s. En cada simulación se calcularon todos los índices de desempeño propuestos y se hicieron gráficas de la variación en altura de cada uno de ellos. Todos estos datos y gráficas se reportan en los Apéndices A y B respectivamente.

6.2.1 Marco de Tres Niveles.

En las figuras 6.1 a 6.3 se muestra la variación de cada índice de desempeño con relación a cada nivel del marco para dispositivos semi-activos. Únicamente se muestran las gráficas de los registros sísmicos escalados a la velocidad máxima de 0.5 m/s, las gráficas resultantes de los registros escalados a 0.25 m/s se reportan en el Apéndice B puesto que presentan un comportamiento similar en cada gráfica. Para el caso de la variación de los índices con el uso de actuadores activos se muestran las figuras 6.4 a 6.6.

Para analizar los índices de desempeño obtenidos en cada estructura se decidió resumirlos en tablas con los valores siguientes: máximo, mínimo y el promedio de entre todos los niveles por estructura. Entre menores sean estos valores, habrá mayor reducción de la respuesta. Si los resultados son muy cercanos a la unidad la reducción es casi nula y si son mayores a uno existe amplificación de la respuesta. En las tablas 6.7 a 6.9 se resumen los índices de desempeño correspondientes al marco de 3 niveles, con dispositivos semi-activos. Para el caso de actuadores activos se resumen los resultados del marco de 3 niveles en las tablas 6.10 a 6.11.

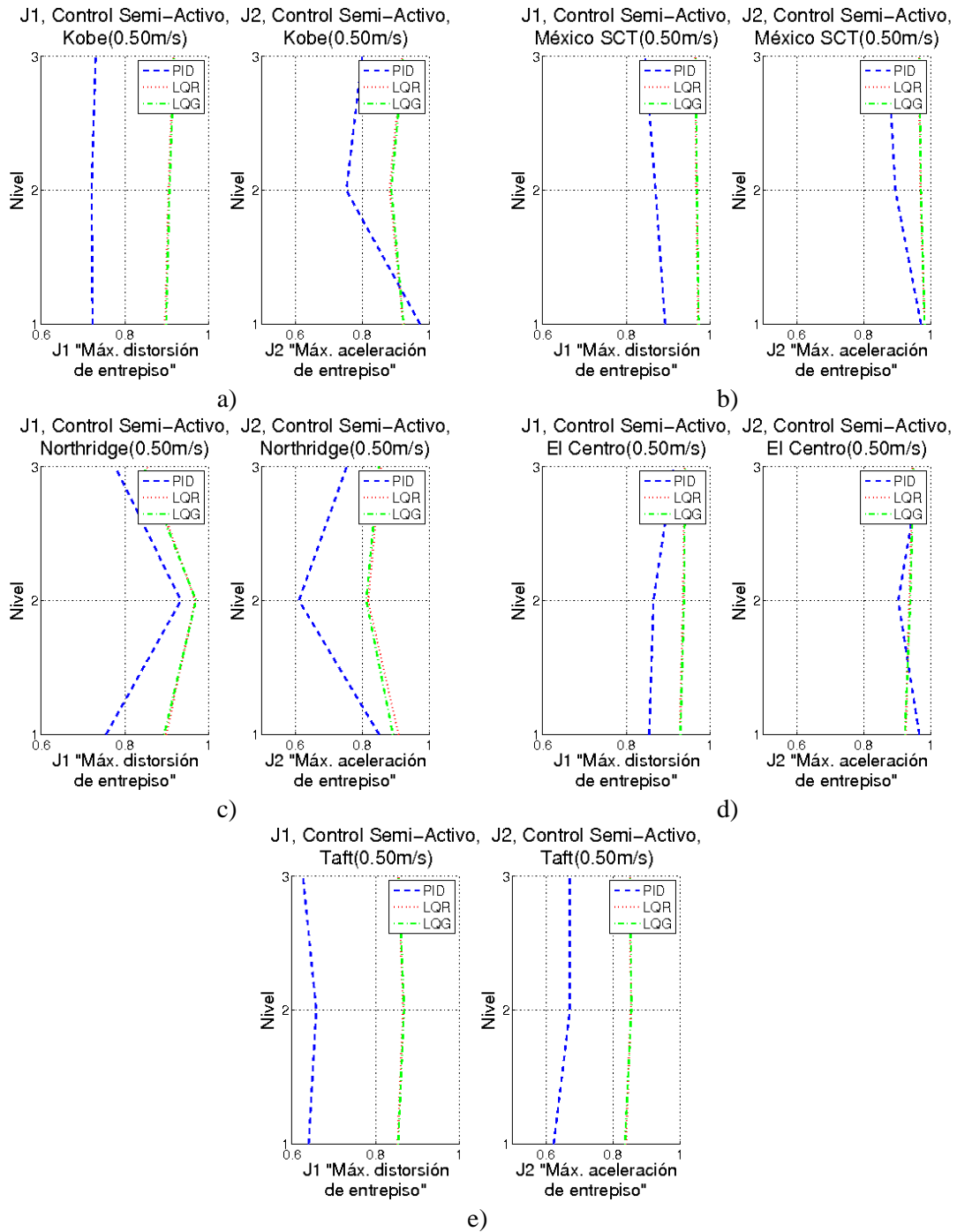


Figura 6.1.- Gráfica de J1 y J2 para el marco de tres niveles : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s

Tabla 6.7.- Resumen de los índices J1, J2 y J3 de la estructura de tres niveles en control semi-activo

Escala del registro	Registro		J1			J2			J3		
			Máxima distorsión de entrepiso			Máxima aceleración de entrepiso			Máximo cortante basal		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	max	0.7301	0.9157	0.9175	0.9735	0.9232	0.9241	0.7293	0.8964	0.8999
		min	0.7204	0.8961	0.8985	0.7532	0.8825	0.8873			
		prom	0.7244	0.9054	0.9075	0.8425	0.9088	0.9116			
	Mexico SCT	max	0.8928	0.9713	0.9727	0.9718	0.9819	0.9823	0.9033	0.9730	0.9744
		min	0.8446	0.9641	0.9657	0.8731	0.9652	0.9665			
		prom	0.8690	0.9675	0.9690	0.9133	0.9723	0.9735			
	Northridge	max	0.9336	0.9681	0.9698	0.8508	0.9090	0.8922	0.7878	0.9348	0.9285
		min	0.7550	0.8523	0.8447	0.6115	0.8184	0.8123			
		prom	0.8219	0.9062	0.9028	0.7389	0.8611	0.8515			
	El Centro	max	0.9127	0.9384	0.9404	0.9716	0.9475	0.9499	0.8630	0.9268	0.9278
		min	0.8546	0.9278	0.9290	0.9037	0.9263	0.9239			
		prom	0.8774	0.9339	0.9358	0.9473	0.9368	0.9378			
	Taft	max	0.6582	0.8661	0.8680	0.6721	0.8536	0.8553	0.6391	0.8526	0.8539
		min	0.6263	0.8524	0.8540	0.6237	0.8392	0.8362			
		prom	0.6416	0.8574	0.8589	0.6554	0.8479	0.8478			
0.25 m/s	Kobe	max	0.7020	0.9157	0.9175	0.8923	0.9232	0.9241	0.7213	0.8964	0.8999
		min	0.6841	0.8961	0.8985	0.7207	0.8825	0.8873			
		prom	0.6911	0.9054	0.9075	0.7803	0.9088	0.9116			
	Mexico SCT	max	0.8933	0.9713	0.9727	0.9719	0.9819	0.9823	0.9038	0.9730	0.9744
		min	0.8455	0.9641	0.9657	0.8738	0.9652	0.9665			
		prom	0.8697	0.9675	0.9690	0.9137	0.9723	0.9735			
	Northridge	max	0.9224	0.9681	0.9698	0.8125	0.9090	0.8922	0.7813	0.9348	0.9285
		min	0.7506	0.8523	0.8447	0.6243	0.8184	0.8123			
		prom	0.8080	0.9062	0.9028	0.7231	0.8611	0.8515			
	El Centro	max	0.8420	0.9384	0.9404	0.9472	0.9475	0.9499	0.7983	0.9268	0.9278
		min	0.7931	0.9278	0.9290	0.8567	0.9263	0.9239			
		prom	0.8127	0.9339	0.9358	0.8963	0.9368	0.9378			
	Taft	max	0.6520	0.8661	0.8680	0.6277	0.8536	0.8553	0.6292	0.8526	0.8539
		min	0.6057	0.8524	0.8540	0.5848	0.8392	0.8362			
		prom	0.6292	0.8574	0.8589	0.6107	0.8479	0.8478			
			J _i mayores a 1		Controlador con menor J _i máximo						
			Controlador con mayor reducción de J _i								
			Controlador con menor J _i ; promedio de todos los niveles								

Al observar los resultados en la Tabla 6.7 y en la Figura 6.1 se evalúan los índices J1, J2 y J3 para el marco de 3 niveles semi-activo. Para el índice de desempeño que evalúa la distorsión de entrepiso máxima (J1), en todos los registros el algoritmo que presenta mayor reducción es el PID. En el caso de aceleraciones máximas (J2) generalmente los de menores resultados son el PID con excepción de los registros de Kobe y El Centro a 0.5 m/s. Pero la diferencia entre los valores menores en estos dos registros es ± 0.05 pts. En las gráficas de J1 y J2 (Figura 6.1) también se observa este mejor desempeño del controlador PID para cada uno de los registros con sus dos excepciones. Además de que el comportamiento de los controladores LQG y LQR es muy similar. En el caso del cortante basal máximo (J3) el algoritmo PID presenta mayor reducción con hasta 37.1%, En ambos registros de Taft.

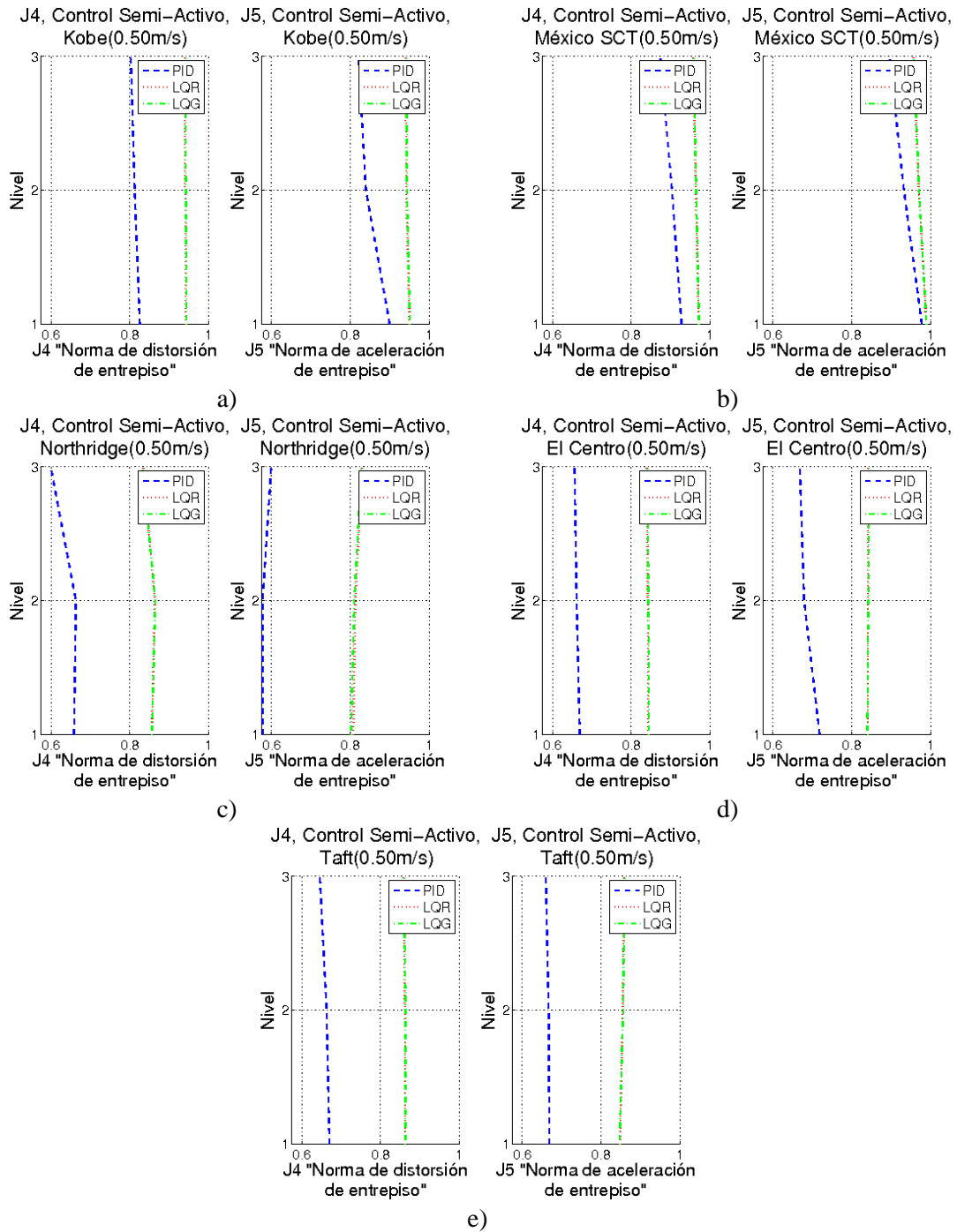


Figura 6.2.- Gráfica de J4 y J5 para el marco de tres niveles : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s

Tabla 6.8.- Resumen de los índices J4, J5 y J6 de la estructura de tres niveles en control semi-activo

Escala del registro	Registro		J4 Norma de la Distorsión de entrepiso			J5 Norma de aceleración de entrepiso			J6 Norma del cortante basal		
		PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG	
0.5 m/s	Kobe	max	0.8254	0.9419	0.9439	0.9001	0.9507	0.9515	0.8365	0.9444	0.9466
		min	0.8024	0.9383	0.9404	0.8209	0.9402	0.9425			
		prom	0.8133	0.9402	0.9422	0.8535	0.9443	0.9460			
	Mexico SCT	max	0.9277	0.9708	0.9718	0.9780	0.9897	0.9899	0.9354	0.9722	0.9728
		min	0.8735	0.9568	0.9583	0.8962	0.9567	0.9576			
		prom	0.9014	0.9637	0.9649	0.9356	0.9722	0.9728			
	Northridge	max	0.6633	0.8634	0.8647	0.5995	0.8301	0.8286	0.6656	0.8562	0.8563
		min	0.5992	0.8339	0.8321	0.5774	0.8081	0.8023			
		prom	0.6403	0.8510	0.8510	0.5849	0.8172	0.8138			
	El Centro	max	0.6693	0.8428	0.8446	0.7185	0.8404	0.8422	0.6784	0.8451	0.8471
		min	0.6562	0.8390	0.8407	0.6680	0.8403	0.8401			
		prom	0.6622	0.8411	0.8430	0.6886	0.8404	0.8414			
Taft	max	0.6704	0.8617	0.8634	0.6688	0.8587	0.8604	0.6796	0.8631	0.8649	
	min	0.6458	0.8577	0.8591	0.6599	0.8486	0.8471				
	prom	0.6598	0.8601	0.8617	0.6653	0.8541	0.8546				
0.25 m/s	Kobe	max	0.8121	0.9419	0.9439	0.8764	0.9507	0.9515	0.8234	0.9444	0.9466
		min	0.7761	0.9383	0.9404	0.8005	0.9402	0.9425			
		prom	0.7947	0.9402	0.9422	0.8341	0.9443	0.9460			
	Mexico SCT	max	0.9279	0.9708	0.9718	0.9780	0.9897	0.9899	0.9356	0.9722	0.9728
		min	0.8740	0.9568	0.9583	0.8966	0.9567	0.9576			
		prom	0.9018	0.9637	0.9649	0.9358	0.9722	0.9728			
	Northridge	max	0.6698	0.8634	0.8647	0.6012	0.8301	0.8286	0.6727	0.8562	0.8563
		min	0.6026	0.8339	0.8321	0.5759	0.8081	0.8023			
		prom	0.6461	0.8510	0.8510	0.5883	0.8172	0.8138			
	El Centro	max	0.6273	0.8428	0.8446	0.6777	0.8404	0.8422	0.6365	0.8451	0.8471
		min	0.6025	0.8390	0.8407	0.6189	0.8403	0.8401			
		prom	0.6150	0.8411	0.8430	0.6441	0.8404	0.8414			
Taft	max	0.6637	0.8617	0.8634	0.6621	0.8587	0.8604	0.6729	0.8631	0.8649	
	min	0.6350	0.8577	0.8591	0.6509	0.8486	0.8471				
	prom	0.6513	0.8601	0.8617	0.6583	0.8541	0.8546				
			J _i mayores a 1		Controlador con menor J _i máximo						
			Controlador con mayor reducción de J _i								
			Controlador con menor J _i ; promedio de todos los niveles								

En la tabla 6.8 y en la figura 6.9 se muestran los resultados de los índices J4, J5 y J6. Para los tres índices de esta tabla; que relacionan la norma de distorsión, aceleración y cortante basal; claramente se observa mayor reducción de la respuesta con el algoritmo PID. En el registro que se presenta mayor reducción de estos tres índices es el de Northridge a 0.50 m/s, con reducciones mayores al 33%.

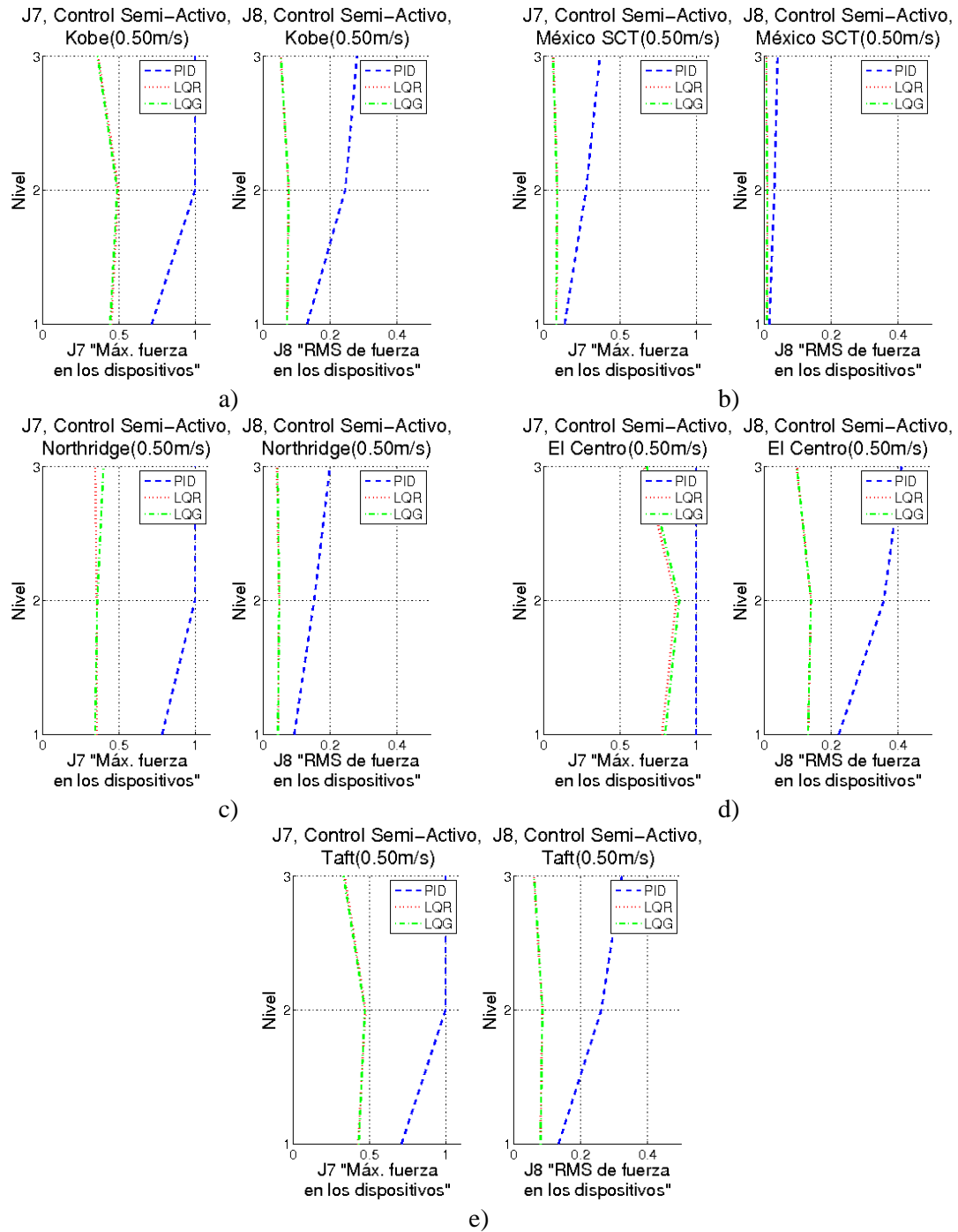


Figura 6.3.- Gráfica de J7 y J8 para el marco de tres niveles : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s

Tabla 6.9.- Resumen de los índices J7 y J8 de la estructura de tres niveles en control semi-activo

Escala del registro	Registro		J7 Máxima fuerza en los dispositivos			J8 Norma de la fuerza en los dispositivos		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	max	1.0000	0.4975	0.4884	0.2804	0.0765	0.0766
		min	0.7148	0.3621	0.3587	0.1316	0.0525	0.0527
		prom	0.9049	0.4362	0.4297	0.2191	0.0668	0.0669
	Mexico SCT	max	0.3679	0.0888	0.0866	0.0400	0.0090	0.0088
		min	0.1362	0.0606	0.0593	0.0152	0.0061	0.0059
		prom	0.2606	0.0775	0.0756	0.0285	0.0079	0.0077
	Northridge	max	1.0000	0.3529	0.3983	0.1995	0.0476	0.0482
		min	0.7832	0.3432	0.3427	0.0931	0.0410	0.0424
		prom	0.9277	0.3496	0.3662	0.1483	0.0446	0.0449
	El Centro	max	1.0000	0.8689	0.8895	0.4106	0.1400	0.1401
		min	1.0000	0.6558	0.6760	0.2230	0.0969	0.0973
		prom	1.0000	0.7669	0.7871	0.3304	0.1228	0.1229
	Taft	max	1.0000	0.4734	0.4696	0.3233	0.0857	0.0861
		min	0.7105	0.3370	0.3292	0.1343	0.0604	0.0611
		prom	0.9035	0.4121	0.4094	0.2399	0.0754	0.0758
0.25 m/s	Kobe	max	1.0000	0.2487	0.2442	0.1737	0.0383	0.0383
		min	0.3679	0.1811	0.1793	0.0629	0.0263	0.0263
		prom	0.7106	0.2181	0.2148	0.1220	0.0334	0.0335
	Mexico SCT	max	0.1831	0.0444	0.0433	0.0199	0.0045	0.0044
		min	0.0678	0.0303	0.0296	0.0075	0.0030	0.0030
		prom	0.1297	0.0387	0.0378	0.0142	0.0039	0.0038
	Northridge	max	0.9942	0.1765	0.1991	0.1037	0.0238	0.0241
		min	0.3745	0.1716	0.1714	0.0450	0.0205	0.0212
		prom	0.7080	0.1748	0.1831	0.0751	0.0223	0.0224
	El Centro	max	1.0000	0.4344	0.4448	0.2582	0.0700	0.0701
		min	0.7020	0.3279	0.3380	0.1032	0.0485	0.0487
		prom	0.9007	0.3835	0.3936	0.1879	0.0614	0.0614
	Taft	max	0.9030	0.2367	0.2348	0.1756	0.0428	0.0430
		min	0.3631	0.1685	0.1646	0.0649	0.0302	0.0305
		prom	0.6520	0.2060	0.2047	0.1239	0.0377	0.0379
			J _i mayores a 1		Controlador con menor J _i máximo			
			Controlador con mayor reducción de J _i					
			Controlador con menor J _i ; promedio de todos los niveles					

Los índices J7 y J8 evalúan las fuerzas aplicadas por los dispositivos en cada nivel, los resultados se muestran en la Figura 6.3 y se resumen en la tabla 6.9. Observando los resultados en estos dos índices se aprecia que los controladores con menor aplicación de fuerzas o consumo de energía son el LQG y LQR. Para el controlador PID se observa en el índice J7 de la Figura 6.3, que algunos dispositivos alcanzan su capacidad máxima. Para el registro de El Centro (0.5 m/s), se alcanza la máxima fuerza en los dispositivos de todos los niveles. Con los registros de Kobe, Northridge y Taft sólo los dispositivos en los niveles 2 y 3 alcanzan su máxima capacidad. Evaluando el índice J8 de los tres controladores, la fuerza aplicada promedio se mantiene por debajo del 50 % de la capacidad máxima en todos los dispositivos

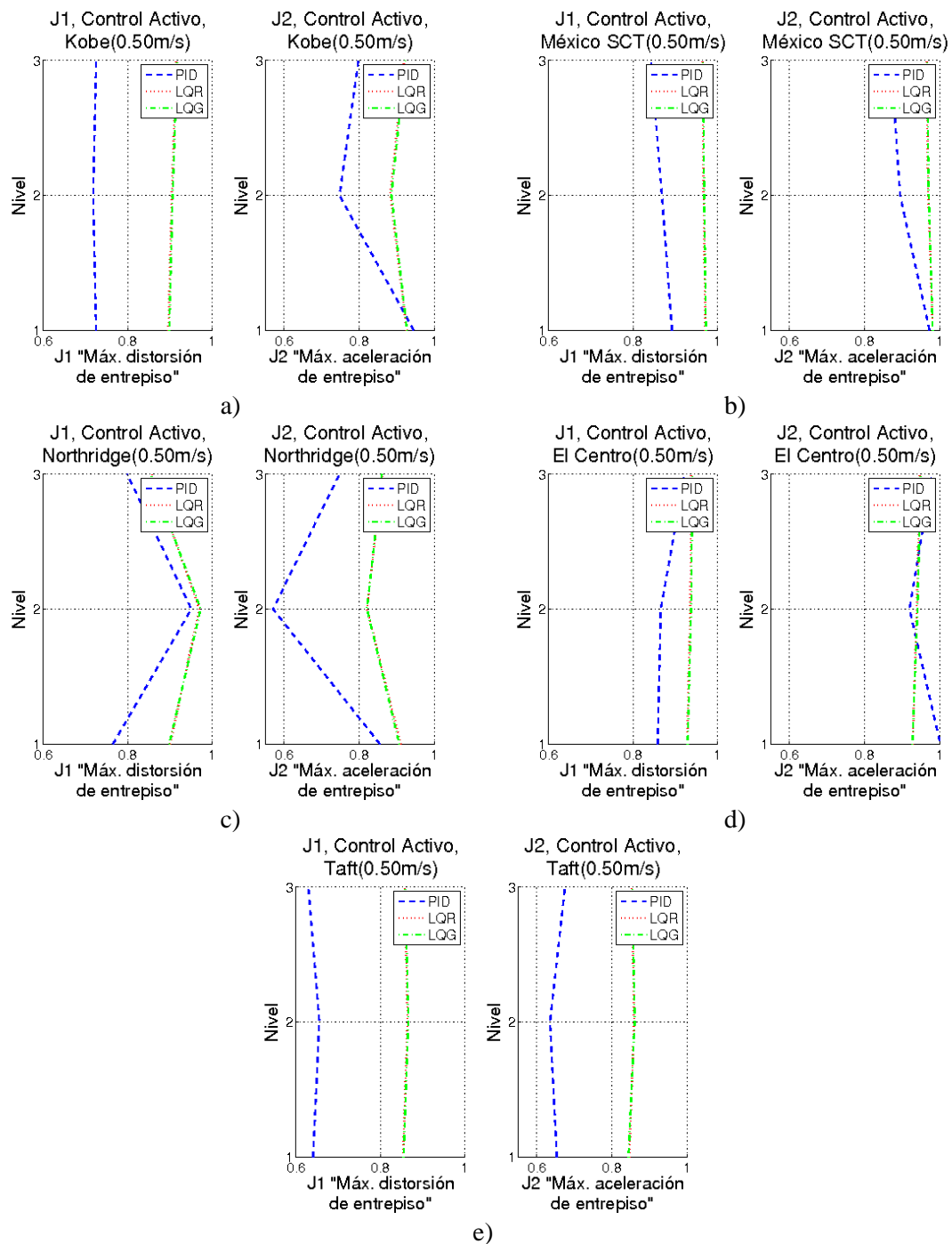


Figura 6.4.- Gráfica de J1 y J2 para el marco de tres niveles en control activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s

Tabla 6.10.- Resumen de los índices J1, J2 y J3 de la estructura de tres niveles en control activo

Escala del registro	Registro		J1 Máxima distorsión de entrepiso			J2 Máxima aceleración de entrepiso			J3 Máximo cortante basal		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	max	0.7254	0.9152	0.9171	0.9456	0.9268	0.9274	0.7318	0.8967	0.9001
		min	0.7183	0.8963	0.8986	0.7476	0.8826	0.8858			
		prom	0.7229	0.9053	0.9074	0.8305	0.9099	0.9121			
	Mexico SCT	max	0.8924	0.9713	0.9727	0.9734	0.9818	0.9818	0.9031	0.9730	0.9744
		min	0.8426	0.9642	0.9659	0.8706	0.9653	0.9668			
		prom	0.8678	0.9675	0.9690	0.9129	0.9723	0.9732			
	Northridge	max	0.9510	0.9702	0.9731	0.8552	0.9112	0.9071	0.8051	0.9375	0.9341
		min	0.7651	0.8571	0.8543	0.5703	0.8209	0.8207			
		prom	0.8384	0.9093	0.9086	0.7243	0.8644	0.8628			
	El Centro	max	0.9226	0.9384	0.9405	1.0021	0.9474	0.9501	0.8681	0.9255	0.9256
		min	0.8582	0.9280	0.9293	0.9200	0.9285	0.9278			
		prom	0.8822	0.9340	0.9359	0.9674	0.9384	0.9397			
	Taft	max	0.6554	0.8643	0.8664	0.6752	0.8592	0.8609	0.6401	0.8539	0.8552
		min	0.6293	0.8535	0.8550	0.6352	0.8469	0.8441			
		prom	0.6418	0.8584	0.8600	0.6546	0.8530	0.8530			
0.25 m/s	Kobe	max	0.7049	0.9152	0.9171	0.9320	0.9268	0.9274	0.7252	0.8967	0.9001
		min	0.6836	0.8963	0.8986	0.7198	0.8826	0.8858			
		prom	0.6915	0.9053	0.9074	0.7917	0.9099	0.9121			
	Mexico SCT	max	0.8928	0.9713	0.9727	0.9735	0.9818	0.9818	0.9035	0.9730	0.9744
		min	0.8437	0.9642	0.9659	0.8719	0.9653	0.9668			
		prom	0.8685	0.9675	0.9690	0.9149	0.9723	0.9732			
	Northridge	max	0.9404	0.9702	0.9731	0.8347	0.9112	0.9071	0.7958	0.9375	0.9341
		min	0.7589	0.8571	0.8543	0.5828	0.8209	0.8207			
		prom	0.8258	0.9093	0.9086	0.7423	0.8644	0.8628			
	El Centro	max	0.8417	0.9384	0.9405	0.9501	0.9474	0.9501	0.8056	0.9255	0.9256
		min	0.7991	0.9280	0.9293	0.9000	0.9285	0.9278			
		prom	0.8153	0.9340	0.9359	0.9324	0.9384	0.9397			
	Taft	max	0.6475	0.8643	0.8664	0.6259	0.8592	0.8609	0.6313	0.8539	0.8552
		min	0.6047	0.8535	0.8550	0.6116	0.8469	0.8441			
		prom	0.6276	0.8584	0.8600	0.6211	0.8530	0.8530			
			J _i mayores a 1		Controlador con menor J _i máximo						
			Controlador con mayor reducción de J _i								
			Controlador con menor J _i ; promedio de todos los niveles								

En la Figura 6.4 y en la tabla 6.10 son mostrados los valores de los índices J1, J2 y J3 del marco de tres niveles con control activo. Para este caso todas las distorsiones de entrepiso tienen una mayor reducción con el controlador PID. Al igual que en el control semi-activo, todas las aceleraciones máximas son menores con el algoritmo PID, con la excepción de los registros de Kobe y El Centro. Observando los espectros de estos dos registros (Figuras 5.2, 5.3, 5.5 y 5.6), son los que más le exigen a la estructura de tres niveles. Incluso con el registro de El Centro, no hay reducción del índice J2 para el control PID en el dispositivo del nivel uno. Por último, el cortante basal máximo mantiene la misma tendencia que las distorsiones, al tener valores menores con el algoritmo PID.

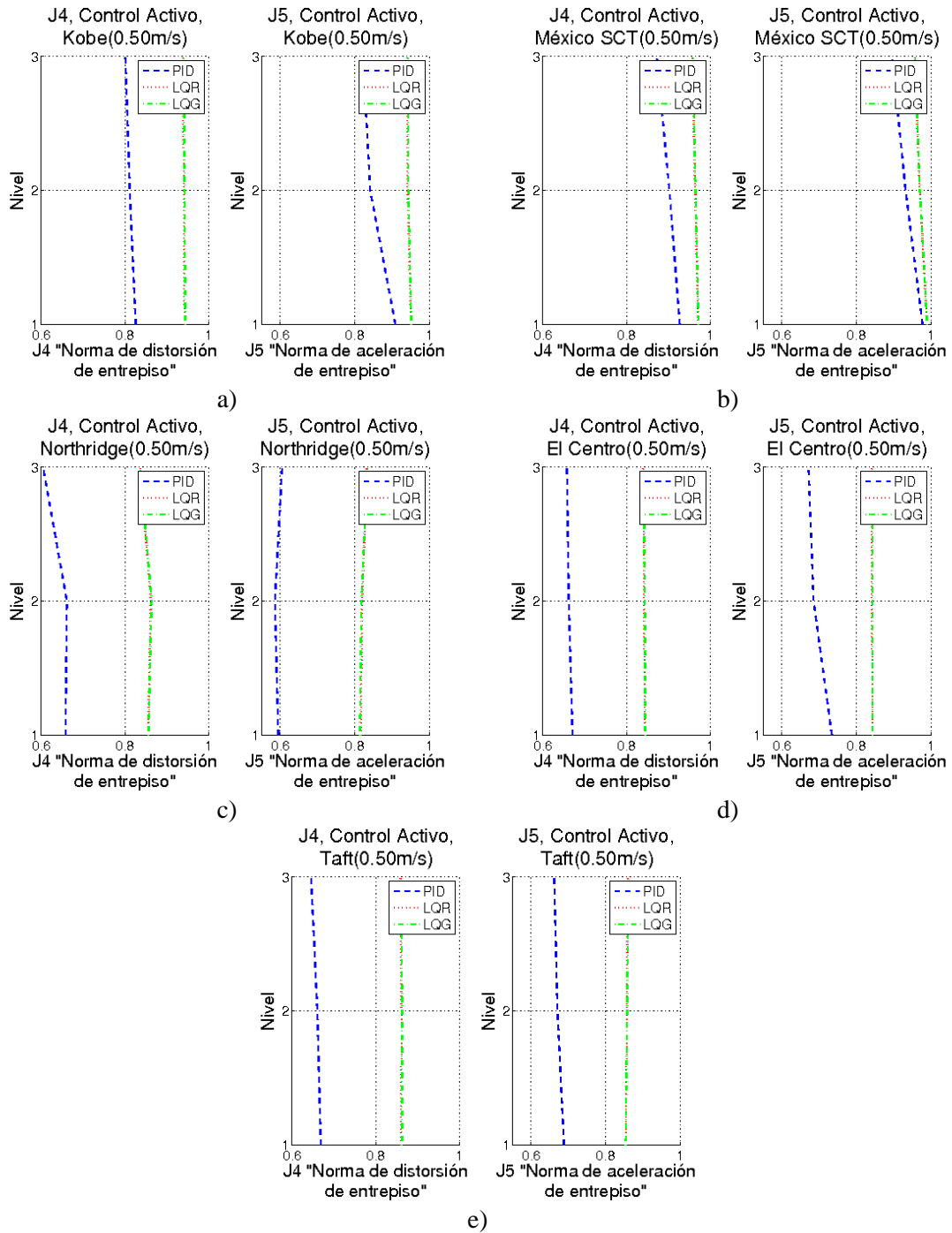


Figura 6.5.- Gráfica de J4 y J5 para el marco de tres niveles en control activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s

Tabla 6.11.- Resumen de los índices J4, J5 y J6 de la estructura de tres niveles en control activo

Escala del registro	Registro		J4 Norma de la Distorsión de entrepiso			J5 Norma de aceleración de entrepiso			J6 Norma del cortante basal		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	max	0.8256	0.9419	0.9440	0.9091	0.9513	0.9521	0.8370	0.9444	0.9466
		min	0.8009	0.9384	0.9405	0.8223	0.9402	0.9426			
		prom	0.8127	0.9402	0.9423	0.8576	0.9445	0.9463			
	Mexico SCT	max	0.9270	0.9708	0.9718	0.9778	0.9897	0.9899	0.9352	0.9722	0.9728
		min	0.8720	0.9568	0.9583	0.8959	0.9567	0.9576			
		prom	0.9004	0.9637	0.9649	0.9353	0.9722	0.9728			
	Northridge	max	0.6615	0.8617	0.8636	0.6052	0.8336	0.8337	0.6664	0.8561	0.8569
		min	0.6044	0.8365	0.8361	0.5855	0.8178	0.8141			
		prom	0.6413	0.8511	0.8520	0.5951	0.8238	0.8220			
	El Centro	max	0.6711	0.8427	0.8446	0.7343	0.8432	0.8431	0.6806	0.8450	0.8470
		min	0.6575	0.8390	0.8408	0.6715	0.8405	0.8424			
		prom	0.6635	0.8411	0.8429	0.6969	0.8415	0.8427			
	Taft	max	0.6688	0.8612	0.8632	0.6882	0.8595	0.8614	0.6784	0.8629	0.8649
		min	0.6456	0.8583	0.8599	0.6620	0.8556	0.8542			
		prom	0.6583	0.8601	0.8619	0.6736	0.8573	0.8579			
0.25 m/s	Kobe	max	0.8115	0.9419	0.9440	0.8770	0.9513	0.9521	0.8229	0.9444	0.9466
		min	0.7763	0.9384	0.9405	0.8003	0.9402	0.9426			
		prom	0.7944	0.9402	0.9423	0.8342	0.9445	0.9463			
	Mexico SCT	max	0.9273	0.9708	0.9718	0.9779	0.9897	0.9899	0.9354	0.9722	0.9728
		min	0.8726	0.9568	0.9583	0.8963	0.9567	0.9576			
		prom	0.9008	0.9637	0.9649	0.9356	0.9722	0.9728			
	Northridge	max	0.6657	0.8617	0.8636	0.6083	0.8336	0.8337	0.6722	0.8561	0.8569
		min	0.6082	0.8365	0.8361	0.5979	0.8178	0.8141			
		prom	0.6460	0.8511	0.8520	0.6020	0.8238	0.8220			
	El Centro	max	0.6272	0.8427	0.8446	0.6966	0.8432	0.8431	0.6367	0.8450	0.8470
		min	0.6031	0.8390	0.8408	0.6208	0.8405	0.8424			
		prom	0.6149	0.8411	0.8429	0.6521	0.8415	0.8427			
	Taft	max	0.6618	0.8612	0.8632	0.6795	0.8595	0.8614	0.6712	0.8629	0.8649
		min	0.6356	0.8583	0.8599	0.6524	0.8556	0.8542			
		prom	0.6500	0.8601	0.8619	0.6656	0.8573	0.8579			

J_i mayores a 1
Controlador con menor J_i máximo
Controlador con mayor reducción de J_i
Controlador con menor J_i; promedio de todos los niveles

En el caso de la evaluación de: norma de distorsión de entrepiso (J4), norma de aceleración de entrepiso (J5) y norma del cortante basal (J6); son menores con el controlador PID en todos los casos. Con reducciones en los valores máximos de distorsión desde el 7.3% con el registro de México SCT hasta del 37.3 % en la excitación de El Centro. Para la norma de aceleraciones las reducciones de los valores máximos van de un 2.3 % en México SCT a 39.5 % con el registro de Northridge (Figura 6.5 y Tabla 6.11).

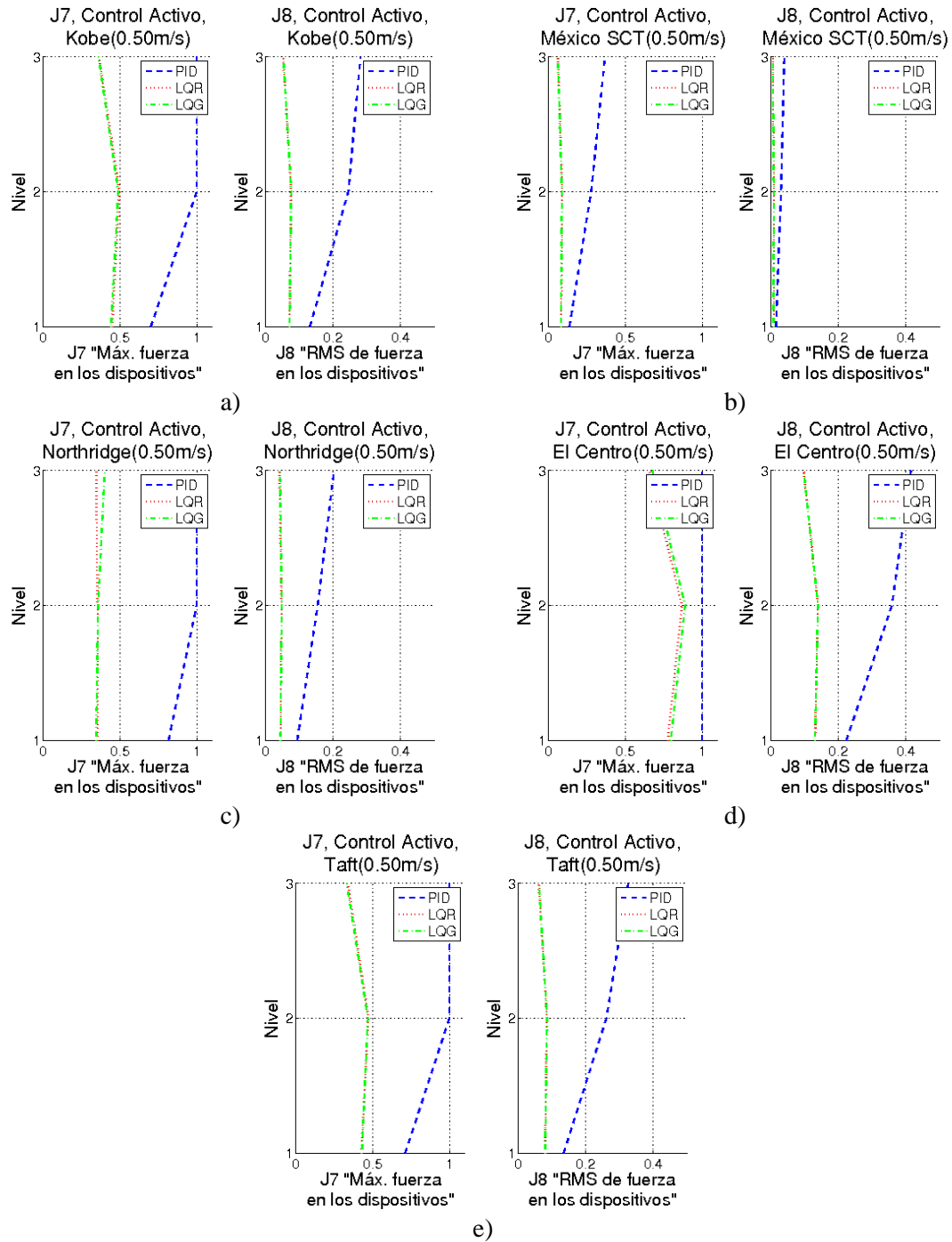


Figura 6.6.- Gráfica de J7 y J8 para el marco de tres niveles en control activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s

Tabla 6.12.- Resumen de los índices J7 y J8 de la estructura de tres niveles en control activo

Escala del registro	Registro		J7 Máxima fuerza en los dispositivos			J8 RMS de la fuerza en los dispositivos		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	max	1.0000	0.4976	0.4885	0.2818	0.0765	0.0766
		min	0.7007	0.3622	0.3587	0.1320	0.0525	0.0527
		prom	0.9002	0.4363	0.4296	0.2198	0.0668	0.0670
	Mexico SCT	max	0.3674	0.0888	0.0866	0.0400	0.0090	0.0088
		min	0.1360	0.0606	0.0593	0.0152	0.0061	0.0059
		prom	0.2603	0.0775	0.0756	0.0285	0.0079	0.0077
	Northridge	max	1.0000	0.3540	0.4008	0.2031	0.0476	0.0482
		min	0.8163	0.3448	0.3449	0.0945	0.0415	0.0429
		prom	0.9388	0.3504	0.3677	0.1509	0.0448	0.0453
	El Centro	max	1.0000	0.8688	0.8894	0.4153	0.1400	0.1401
		min	1.0000	0.6559	0.6761	0.2240	0.0970	0.0974
		prom	1.0000	0.7669	0.7871	0.3327	0.1228	0.1229
	Taft	max	1.0000	0.4724	0.4685	0.3263	0.0856	0.0861
		min	0.7117	0.3387	0.3309	0.1349	0.0608	0.0614
		prom	0.9039	0.4123	0.4096	0.2410	0.0755	0.0759
0.25 m/s	Kobe	max	1.0000	0.2488	0.2443	0.1738	0.0383	0.0383
		min	0.3678	0.1811	0.1794	0.0629	0.0263	0.0264
		prom	0.7104	0.2181	0.2148	0.1220	0.0334	0.0335
	Mexico SCT	max	0.1829	0.0444	0.0433	0.0199	0.0045	0.0044
		min	0.0677	0.0303	0.0296	0.0075	0.0030	0.0030
		prom	0.1295	0.0387	0.0378	0.0142	0.0039	0.0038
	Northridge	max	1.0000	0.1770	0.2004	0.1053	0.0238	0.0241
		min	0.3852	0.1724	0.1725	0.0458	0.0208	0.0215
		prom	0.7117	0.1752	0.1839	0.0763	0.0224	0.0226
	El Centro	max	1.0000	0.4344	0.4447	0.2595	0.0700	0.0701
		min	0.7030	0.3279	0.3380	0.1039	0.0485	0.0487
		prom	0.9010	0.3835	0.3936	0.1888	0.0614	0.0615
	Taft	max	0.9030	0.2362	0.2342	0.1766	0.0428	0.0430
		min	0.3639	0.1694	0.1654	0.0651	0.0304	0.0307
		prom	0.6519	0.2061	0.2048	0.1243	0.0378	0.0380
			J _i mayores a 1		Controlador con menor J _i máximo			
			Controlador con mayor reducción de J _i					
			Controlador con menor J _i ; promedio de todos los niveles					

La energía utilizada para controladores activos (Figura 6.6 y Tabla 6.12), continúa siendo menor cuando se utilizan los algoritmos LQG y LQR. Cuando se utiliza el controlador PID, evaluando J7, llegan al límite los dispositivos de los niveles 2 y 3 para el registro sísmico de Kobe, Northridge y Taft. En el caso del registro de El Centro, con el algoritmo PID los dispositivos en los tres niveles alcanzan su capacidad máxima.

6.2.2 Marco de Nueve Niveles.

A continuación, se muestran los resultados de la estructura de 9 niveles. Las gráficas de la variación de cada índice de desempeño se muestran en las figuras 6.7 a 6.9 para la estructura con control semi-

activo. Las gráficas que muestran el desempeño de un control activo en la estructura de 9 niveles estan en las figuras 6.10 a 6.12. El resumen de los índices de desempeño con el máximo, mínimo y el promedio de cada valor se presentan en las Tablas 6.13 a 6.15 en control semi- activo y Tablas 6.16 a 6.18 con actuadores activos.

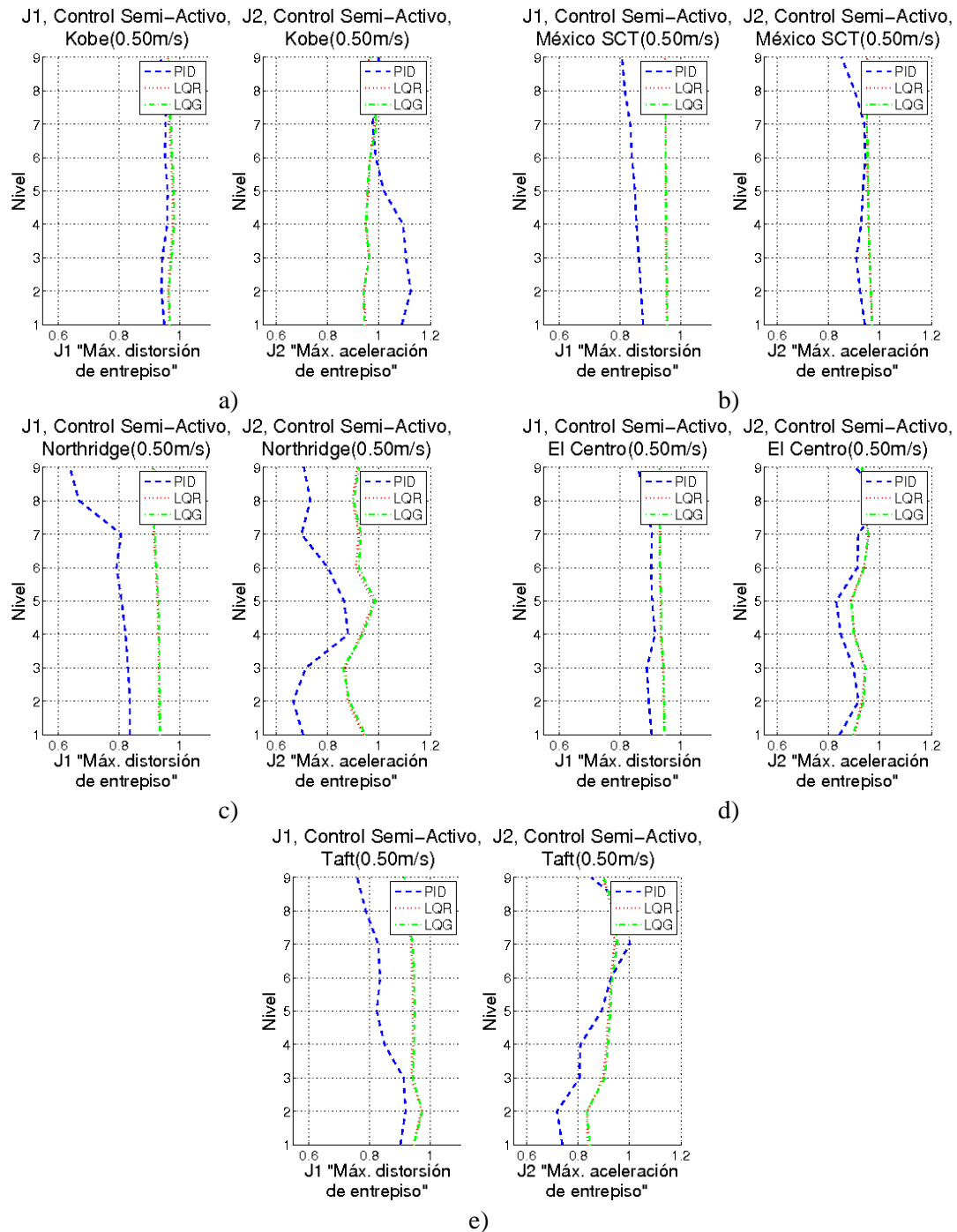


Figura 6.7.- Gráfica de J1 y J2 para el marco de nueve niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s

Tabla 6.13.- Resumen de los índices J1, J2 y J3 de la estructura de nueve niveles en control semi-activo

Escala del registro	Registro		J1 Máxima distorsión de entrepiso			J2 Máxima aceleración de entrepiso			J3 Máximo cortante basal		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	max	0.9597	0.9772	0.9820	1.1237	0.9836	0.9911	0.9578	0.9676	0.9688
		min	0.9357	0.9608	0.9631	0.9740	0.9412	0.9401			
		prom	0.9494	0.9677	0.9709	1.0432	0.9587	0.9600			
	Mexico SCT	max	0.8761	0.9538	0.9559	0.9435	0.9689	0.9702	0.8827	0.9548	0.9559
		min	0.8067	0.9484	0.9505	0.8500	0.9482	0.9499			
		prom	0.8453	0.9504	0.9522	0.9187	0.9554	0.9566			
	Northridge	max	0.8365	0.9327	0.9349	0.8802	0.9792	0.9862	0.8415	0.9327	0.9344
		min	0.6389	0.9036	0.9095	0.6668	0.8698	0.8611			
		prom	0.7821	0.9225	0.9258	0.7529	0.9162	0.9215			
	El Centro	max	0.9151	0.9444	0.9466	1.0096	0.9572	0.9549	0.9107	0.9451	0.9473
		min	0.8585	0.9287	0.9278	0.8303	0.8873	0.8890			
		prom	0.8955	0.9353	0.9365	0.8977	0.9246	0.9243			
	Taft	max	0.9186	0.9719	0.9735	1.0063	0.9412	0.9528	0.8995	0.9319	0.9334
		min	0.7595	0.9164	0.9150	0.7188	0.8350	0.8345			
		prom	0.8463	0.9396	0.9431	0.8615	0.9005	0.9063			
0.25 m/s	Kobe	max	0.9338	0.9736	0.9789	1.1685	0.9773	0.9855	0.9282	0.9631	0.9643
		min	0.8758	0.9586	0.9602	0.9361	0.9412	0.9401			
		prom	0.9119	0.9666	0.9704	1.0496	0.9588	0.9610			
	Mexico SCT	max	0.8767	0.9538	0.9559	0.9406	0.9689	0.9702	0.8832	0.9548	0.9559
		min	0.8069	0.9484	0.9505	0.8504	0.9482	0.9499			
		prom	0.8458	0.9504	0.9522	0.9117	0.9554	0.9566			
	Northridge	max	0.8256	0.9327	0.9349	0.9275	0.9792	0.9862	0.8320	0.9327	0.9344
		min	0.5688	0.9036	0.9095	0.5907	0.8698	0.8611			
		prom	0.7584	0.9225	0.9258	0.7219	0.9162	0.9215			
	El Centro	max	0.8562	0.9385	0.9410	1.0427	0.9395	0.9425	0.8551	0.9389	0.9416
		min	0.7888	0.9195	0.9219	0.7725	0.8948	0.8990			
		prom	0.8369	0.9270	0.9300	0.8552	0.9179	0.9223			
	Taft	max	0.9100	0.9719	0.9735	1.0036	0.9412	0.9528	0.8765	0.9319	0.9334
		min	0.7580	0.9164	0.9150	0.6542	0.8350	0.8345			
		prom	0.8214	0.9396	0.9431	0.8146	0.9005	0.9063			
			J _i mayores a 1			Controlador con menor J _i máximo					
			Controlador con mayor reducción de J _i								
			Controlador con menor J _i ; promedio de todos los niveles								

La reducción de la distorsión de entrepiso máxima representada con J1 es mayor con el controlador PID en todos los registros. Sin embargo, aunque en la mayoría de los casos de la aceleración máxima (J2) el control PID es mejor, se llegan a presentar valores mayores a la unidad. Esto se traduce en que las aceleraciones máximas llegan a aumentar hasta el 12 % con el registro de Kobe a escala de 0.50 m/s y del 16% en el mismo registro escalado a 0.25 m/s (Figura 6.7 y Tabla 6.13).

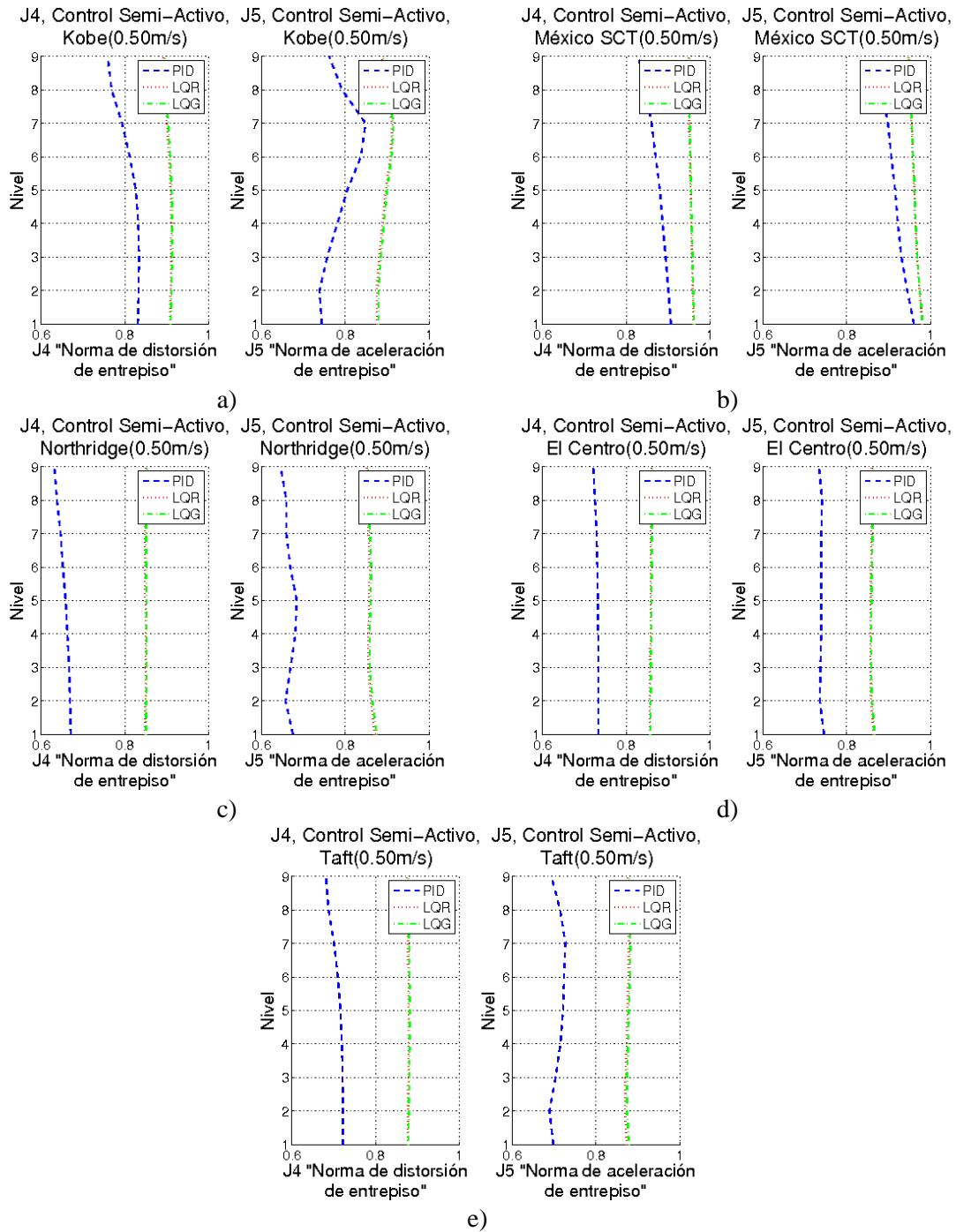


Figura 6.8.- Gráfica de J4 y J5 para el marco de nueve niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s

Tabla 6.14.- Resumen de los índices J4, J5 y J6 de la estructura de nueve niveles en control semi-activo

Escala del registro	Registro		J4 Norma de la Distorsión de entrepiso			J5 Norma de aceleración de entrepiso			J6 Norma del cortante basal		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	max	0.8337	0.9108	0.9133	0.8484	0.9128	0.9154	0.8375	0.9090	0.9116
		min	0.7590	0.8919	0.8953	0.7383	0.8746	0.8792			
		prom	0.8098	0.9042	0.9069	0.7849	0.8911	0.8947			
	Mexico SCT	max	0.9067	0.9601	0.9622	0.9610	0.9804	0.9810	0.9130	0.9610	0.9620
		min	0.8294	0.9482	0.9503	0.8739	0.9473	0.9487			
		prom	0.8747	0.9535	0.9552	0.9152	0.9619	0.9629			
	Northridge	max	0.6707	0.8495	0.8525	0.6841	0.8706	0.8749	0.6776	0.8495	0.8521
		min	0.6316	0.8477	0.8503	0.6453	0.8484	0.8513			
		prom	0.6550	0.8484	0.8511	0.6666	0.8569	0.8605			
	El Centro	max	0.7332	0.8589	0.8611	0.7460	0.8641	0.8668	0.7390	0.8567	0.8588
		min	0.7209	0.8552	0.8571	0.7339	0.8559	0.8582			
		prom	0.7300	0.8576	0.8597	0.7390	0.8587	0.8611			
	Taft	max	0.7216	0.8790	0.8814	0.7269	0.8790	0.8823	0.7282	0.8777	0.8799
		min	0.6814	0.8750	0.8779	0.6888	0.8692	0.8740			
		prom	0.7089	0.8773	0.8798	0.7095	0.8744	0.8783			
0.25 m/s	Kobe	max	0.8010	0.9075	0.9101	0.8184	0.9094	0.9123	0.8072	0.9056	0.9082
		min	0.7176	0.8879	0.8912	0.7060	0.8694	0.8741			
		prom	0.7740	0.9007	0.9034	0.7528	0.8869	0.8905			
	Mexico SCT	max	0.9071	0.9601	0.9622	0.9611	0.9804	0.9810	0.9133	0.9610	0.9620
		min	0.8305	0.9482	0.9503	0.8745	0.9473	0.9487			
		prom	0.8754	0.9535	0.9552	0.9155	0.9619	0.9629			
	Northridge	max	0.6643	0.8495	0.8525	0.6733	0.8706	0.8749	0.6709	0.8495	0.8521
		min	0.6154	0.8477	0.8503	0.6305	0.8484	0.8513			
		prom	0.6454	0.8484	0.8511	0.6524	0.8569	0.8605			
	El Centro	max	0.6859	0.8520	0.8548	0.7029	0.8577	0.8621	0.6923	0.8492	0.8515
		min	0.6652	0.8475	0.8496	0.6830	0.8489	0.8519			
		prom	0.6789	0.8503	0.8527	0.6926	0.8518	0.8550			
	Taft	max	0.7183	0.8790	0.8814	0.7225	0.8790	0.8823	0.7247	0.8777	0.8799
		min	0.6706	0.8750	0.8779	0.6771	0.8692	0.8740			
		prom	0.7024	0.8773	0.8798	0.7011	0.8744	0.8783			
			J _i mayores a 1			Controlador con menor J _i máximo					
			Controlador con mayor reducción de J _i								
			Controlador con menor J _i ; promedio de todos los niveles								

En la Figura 6.8 y en la Tabla 6.14 se presentan los resultados de J4, J5 y J6 en el marco de nueve niveles semi-activo. En el caso de la norma de distorsión de entrepiso (J4), aceleración (J5) y cortante basal (J6) sigue presentando un mejor comportamiento el algoritmo PID. Para la norma de distorsión de entrepiso la reducción en valores máximos llega hasta 33.6 % en el caso del registro sísmico de Northridge (0.25 m/s). El valor máximo de la norma de aceleración tiene una reducción del 32.7% en el mismo registro de Northridge. Para la norma del cortante basal los valores de J6 van desde 0.671 a 0.913, correspondientes a los registros de Northridge (0.25m/s) y México SCT (0.25m/s) respectivamente.

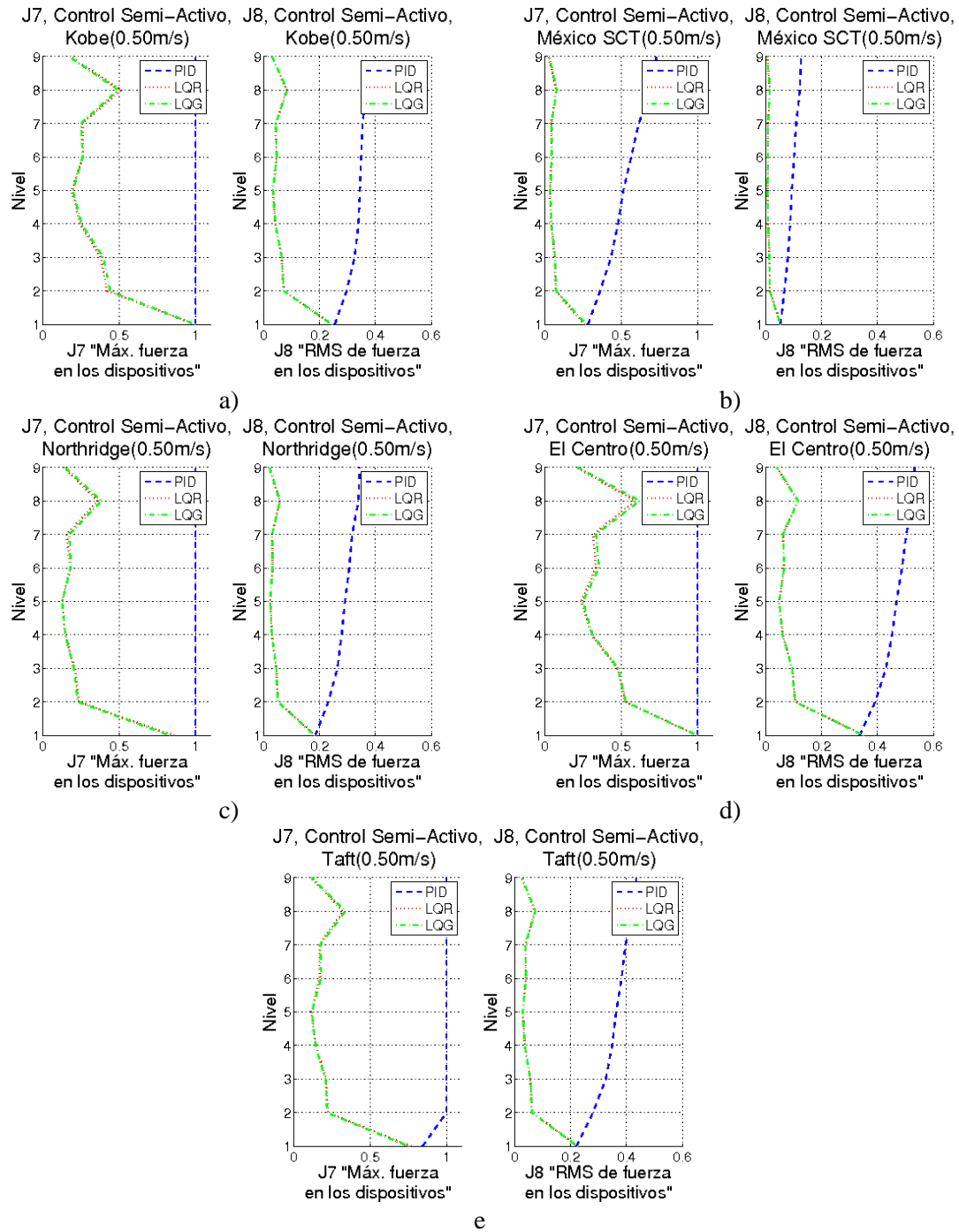


Figura 6.9.- Gráfica de J7 y J8 para el marco de nueve niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s

Tabla 6.15.- Resumen de los índices J7 y J8 de la estructura de nueve niveles en control semi-activo

Escala del registro	Registro		J7 Máxima fuerza en los dispositivos			J8 Norma de la fuerza en los dispositivos		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	max	1.0000	1.0000	1.0000	0.3697	0.2460	0.2456
		min	1.0000	0.1802	0.1722	0.2546	0.0287	0.0295
		prom	1.0000	0.3830	0.3849	0.3334	0.0731	0.0735
	Mexico SCT	max	0.7300	0.2587	0.2697	0.1265	0.0542	0.0529
		min	0.2819	0.0254	0.0269	0.0527	0.0052	0.0051
		prom	0.5200	0.0716	0.0752	0.0933	0.0150	0.0146
	Northridge	max	1.0000	0.8617	0.8345	0.3435	0.1852	0.1824
		min	1.0000	0.1248	0.1264	0.1847	0.0201	0.0206
		prom	1.0000	0.2675	0.2696	0.2841	0.0526	0.0524
	El Centro	max	1.0000	1.0000	1.0000	0.5327	0.3526	0.3514
		min	1.0000	0.2085	0.2145	0.3364	0.0398	0.0402
		prom	1.0000	0.4442	0.4551	0.4592	0.1051	0.1050
	Taft	max	1.0000	0.7666	0.7538	0.4346	0.2272	0.2254
		min	0.8431	0.1116	0.1172	0.2208	0.0253	0.0260
		prom	0.9826	0.2472	0.2493	0.3535	0.0652	0.0652
0.25 m/s	Kobe	max	1.0000	0.7584	0.7984	0.2650	0.1304	0.1302
		min	0.7711	0.0901	0.0861	0.1307	0.0143	0.0147
		prom	0.9730	0.2202	0.2256	0.2142	0.0373	0.0375
	Mexico SCT	max	0.3625	0.1294	0.1348	0.0629	0.0271	0.0264
		min	0.1400	0.0127	0.0134	0.0262	0.0026	0.0025
		prom	0.2582	0.0358	0.0376	0.0464	0.0075	0.0073
	Northridge	max	1.0000	0.4308	0.4173	0.2001	0.0926	0.0912
		min	0.4846	0.0624	0.0632	0.0867	0.0101	0.0103
		prom	0.8205	0.1337	0.1348	0.1489	0.0263	0.0262
	El Centro	max	1.0000	0.9466	0.9424	0.3511	0.1907	0.1899
		min	0.9881	0.1040	0.1081	0.1772	0.0198	0.0199
		prom	0.9987	0.2704	0.2758	0.2829	0.0539	0.0539
	Taft	max	1.0000	0.3833	0.3769	0.2503	0.1136	0.1127
		min	0.4162	0.0558	0.0586	0.1074	0.0126	0.0130
		prom	0.7744	0.1236	0.1247	0.1870	0.0326	0.0326
			J _i mayores a 1			Controlador con menor J _i máximo		
			Controlador con mayor reducción de J _i					
			Controlador con menor J _i ; promedio de todos los niveles					

En el marco de nueve niveles con control PID semi-activo, la fuerza máxima es alcanzada por todos los dispositivos en los registros de Kobe, Northridge, El Centro y Taft, a excepción del dispositivo en el primer nivel con el análisis del registro de Taft. Para esta estructura con dispositivos de control semi- activo los algoritmos con mayor ahorro de energía son el LQR y LQG (Figura 6.9 y Tabla 6.15).

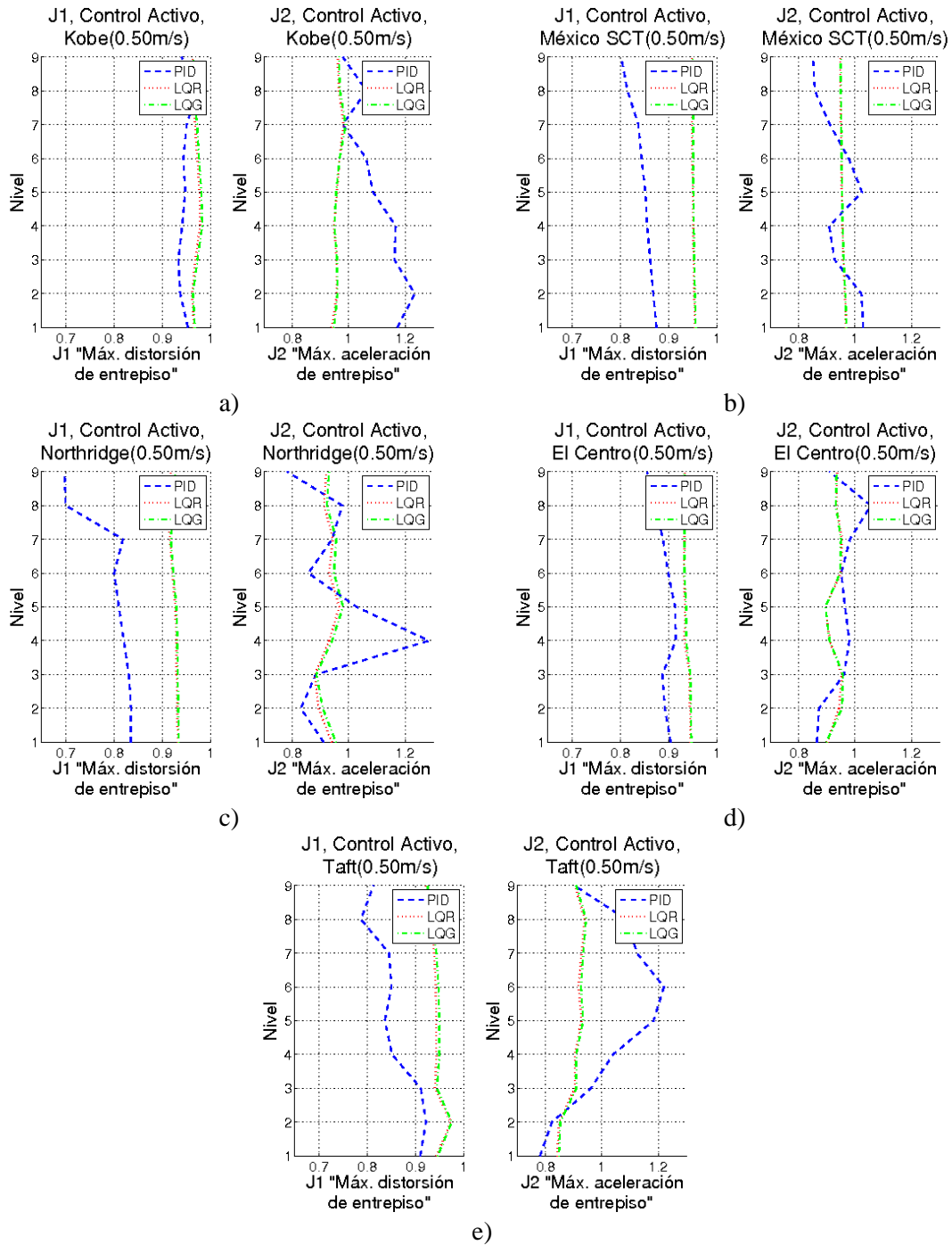


Figura 6.10.- Gráfica de J1 y J2 para el marco de nueve niveles en control activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s

Tabla 6.16.- Resumen de los índices J1, J2 y J3 de la estructura de nueve niveles en control activo

Escala del registro	Registro		J1 Máxima distorsión de entrepiso			J2 Máxima aceleración de entrepiso			J3 Máximo cortante basal		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	max	0.9716	0.9778	0.9825	1.2342	0.9823	0.9897	0.9623	0.9668	0.9683
		min	0.9332	0.9614	0.9634	0.9785	0.9404	0.9482			
		prom	0.9463	0.9683	0.9714	1.1008	0.9599	0.9627			
	Mexico SCT	max	0.8747	0.9538	0.9560	1.0291	0.9686	0.9697	0.8812	0.9548	0.9559
		min	0.8015	0.9483	0.9504	0.8510	0.9482	0.9492			
		prom	0.8455	0.9504	0.9521	0.9456	0.9554	0.9565			
	Northridge	max	0.8353	0.9318	0.9338	1.2851	0.9664	0.9802	0.8403	0.9318	0.9333
		min	0.6976	0.9118	0.9176	0.7818	0.8799	0.8852			
		prom	0.7941	0.9237	0.9276	0.9440	0.9242	0.9361			
	El Centro	max	0.9146	0.9445	0.9469	1.0563	0.9537	0.9576	0.9110	0.9453	0.9477
		min	0.8553	0.9317	0.9307	0.8649	0.8949	0.8951			
		prom	0.8918	0.9365	0.9377	0.9491	0.9308	0.9310			
	Taft	max	0.9216	0.9731	0.9751	1.2203	0.9398	0.9438	0.9077	0.9311	0.9337
		min	0.7870	0.9219	0.9250	0.7807	0.8413	0.8481			
		prom	0.8584	0.9418	0.9460	1.0136	0.9017	0.9073			
0.25 m/s	Kobe	max	0.9475	0.9740	0.9794	1.2260	0.9760	0.9841	0.9193	0.9623	0.9638
		min	0.8954	0.9578	0.9599	0.9646	0.9404	0.9479			
		prom	0.9214	0.9671	0.9709	1.0847	0.9599	0.9637			
	Mexico SCT	max	0.8753	0.9538	0.9560	1.0188	0.9686	0.9697	0.8819	0.9548	0.9559
		min	0.8046	0.9483	0.9504	0.8516	0.9482	0.9492			
		prom	0.8458	0.9504	0.9521	0.9335	0.9554	0.9565			
	Northridge	max	0.8217	0.9318	0.9338	1.1049	0.9664	0.9802	0.8281	0.9318	0.9333
		min	0.6761	0.9118	0.9176	0.7650	0.8799	0.8852			
		prom	0.7818	0.9237	0.9276	0.8823	0.9242	0.9361			
	El Centro	max	0.8551	0.9385	0.9413	1.0055	0.9467	0.9533	0.8557	0.9391	0.9420
		min	0.8360	0.9205	0.9231	0.8733	0.8963	0.9008			
		prom	0.8462	0.9280	0.9312	0.9282	0.9241	0.9289			
	Taft	max	0.9116	0.9731	0.9751	1.1919	0.9398	0.9438	0.8782	0.9311	0.9337
		min	0.7897	0.9219	0.9250	0.7346	0.8413	0.8481			
		prom	0.8359	0.9418	0.9460	0.9671	0.9017	0.9073			
			J _i mayores a 1		Controlador con menor J _i máximo						
			Controlador con mayor reducción de J _i								
			Controlador con menor J _i : promedio de todos los niveles								

En la estructura de nueve niveles, al igual que en el control semi-activo, los dispositivos activos, siguen presentando mayor reducción del índice J1 para el algoritmo PID. Aunque si se observa el índice J2 con este mismo algoritmo, en la mayoría de los casos no hay reducción, sino una amplificación. Dicha amplificación se presenta en todos los registros e incluso puede alcanzar hasta el 28.5 % en el registro de Northridge con escala de 0.5m/s (Figura 6.10 y Tabla 6.16).

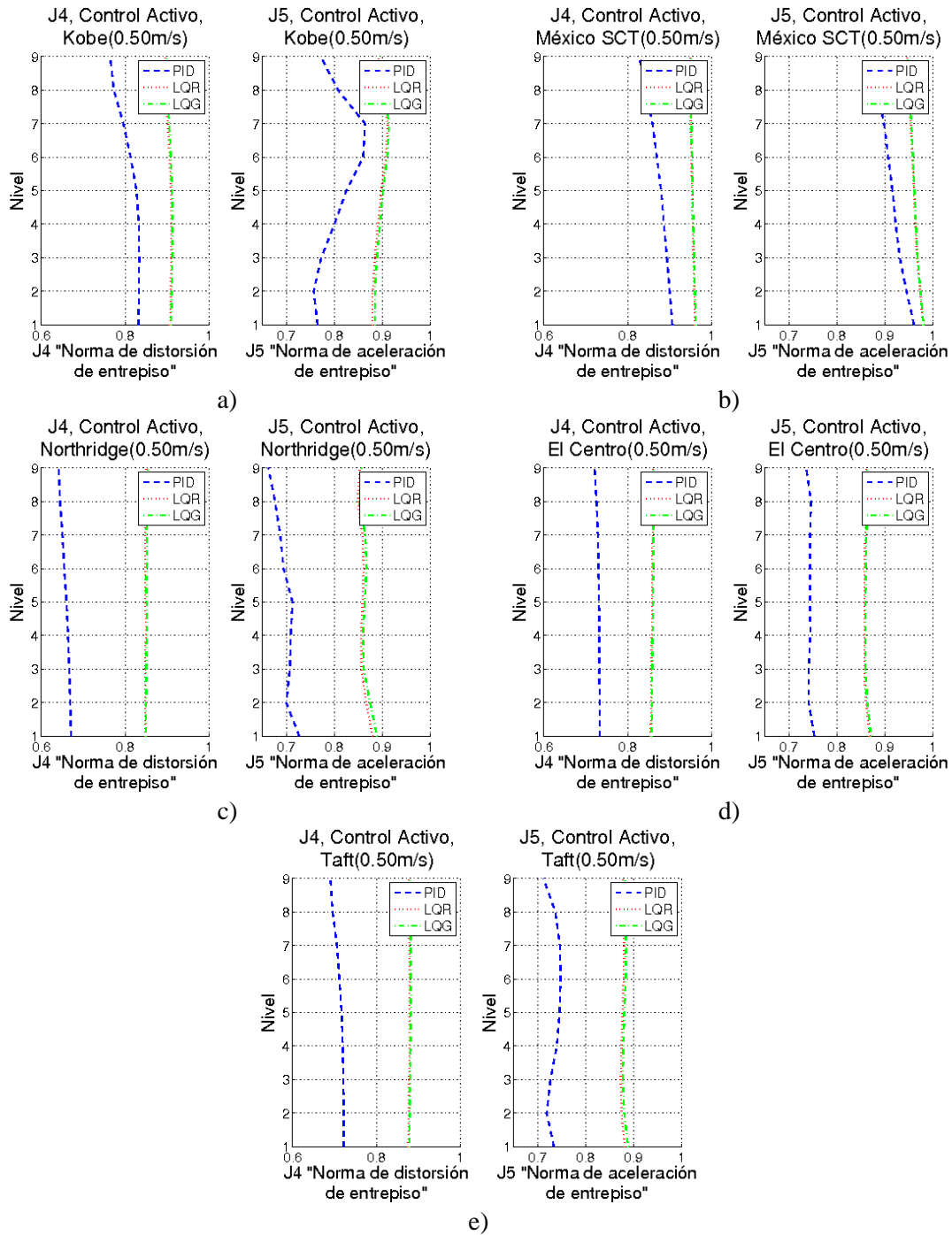


Figura 6.11.- Gráfica de J4 y J5 para el marco de nueve niveles en control activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s

Tabla 6.17.- Resumen de los índices J4, J5 y J6 de la estructura de nueve niveles en control activo

Escala del registro	Registro		J4 Norma de la Distorsión de entepiso			J5 Norma de aceleración de entepiso			J6 Norma del cortante basal		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	max	0.8336	0.9102	0.9129	0.8645	0.9121	0.9150	0.8382	0.9085	0.9113
		min	0.7643	0.8948	0.8985	0.7576	0.8804	0.8852			
		prom	0.8115	0.9047	0.9077	0.8032	0.8940	0.8980			
	Mexico SCT	max	0.9062	0.9601	0.9623	0.9616	0.9804	0.9811	0.9130	0.9610	0.9621
		min	0.8277	0.9482	0.9504	0.8743	0.9473	0.9487			
		prom	0.8738	0.9535	0.9553	0.9159	0.9619	0.9630			
	Northridge	max	0.6710	0.8509	0.8548	0.7276	0.8800	0.8895	0.6784	0.8490	0.8513
		min	0.6416	0.8472	0.8494	0.6628	0.8491	0.8523			
		prom	0.6581	0.8484	0.8512	0.6978	0.8605	0.8660			
	El Centro	max	0.7331	0.8599	0.8621	0.7536	0.8685	0.8713	0.7392	0.8563	0.8585
		min	0.7207	0.8548	0.8568	0.7367	0.8573	0.8595			
		prom	0.7297	0.8576	0.8598	0.7443	0.8602	0.8627			
	Taft	max	0.7221	0.8789	0.8817	0.7484	0.8821	0.8889	0.7293	0.8774	0.8799
		min	0.6903	0.8757	0.8779	0.7126	0.8737	0.8781			
		prom	0.7117	0.8778	0.8807	0.7348	0.8779	0.8824			
0.25 m/s	Kobe	max	0.7995	0.9069	0.9097	0.8228	0.9088	0.9119	0.8068	0.9051	0.9079
		min	0.7364	0.8908	0.8943	0.7398	0.8754	0.8800			
		prom	0.7780	0.9012	0.9041	0.7745	0.8897	0.8937			
	Mexico SCT	max	0.9066	0.9601	0.9623	0.9617	0.9804	0.9811	0.9133	0.9610	0.9621
		min	0.8291	0.9482	0.9504	0.8748	0.9473	0.9487			
		prom	0.8745	0.9535	0.9553	0.9163	0.9619	0.9630			
	Northridge	max	0.6620	0.8509	0.8548	0.7193	0.8800	0.8895	0.6690	0.8490	0.8513
		min	0.6326	0.8472	0.8494	0.6569	0.8491	0.8523			
		prom	0.6487	0.8484	0.8512	0.6874	0.8605	0.8660			
	El Centro	max	0.6855	0.8529	0.8558	0.7199	0.8619	0.8665	0.6922	0.8488	0.8512
		min	0.6649	0.8472	0.8493	0.6908	0.8501	0.8530			
		prom	0.6785	0.8503	0.8528	0.7028	0.8532	0.8565			
	Taft	max	0.7171	0.8789	0.8817	0.7386	0.8821	0.8889	0.7242	0.8774	0.8799
		min	0.6846	0.8757	0.8779	0.7017	0.8737	0.8781			
		prom	0.7056	0.8778	0.8807	0.7239	0.8779	0.8824			
			J _i mayores a 1			Controlador con menor J _i máximo					
			Controlador con mayor reducción de J _i								
			Controlador con menor J _i ; promedio de todos los niveles								

Los valores para J4, J5 y J6 mostrados en representados en la figura 6.11 y resumidos en la tabla 6.17 muestran mayores reducciones en los valores máximos con el algoritmo PID en control activo. Dichas reducciones alcanzan el 33.8% en distorsión de entepiso. Además, hay una reducción del 22.8% en la aceleración para el registro de Northridge (0.25 m/s).

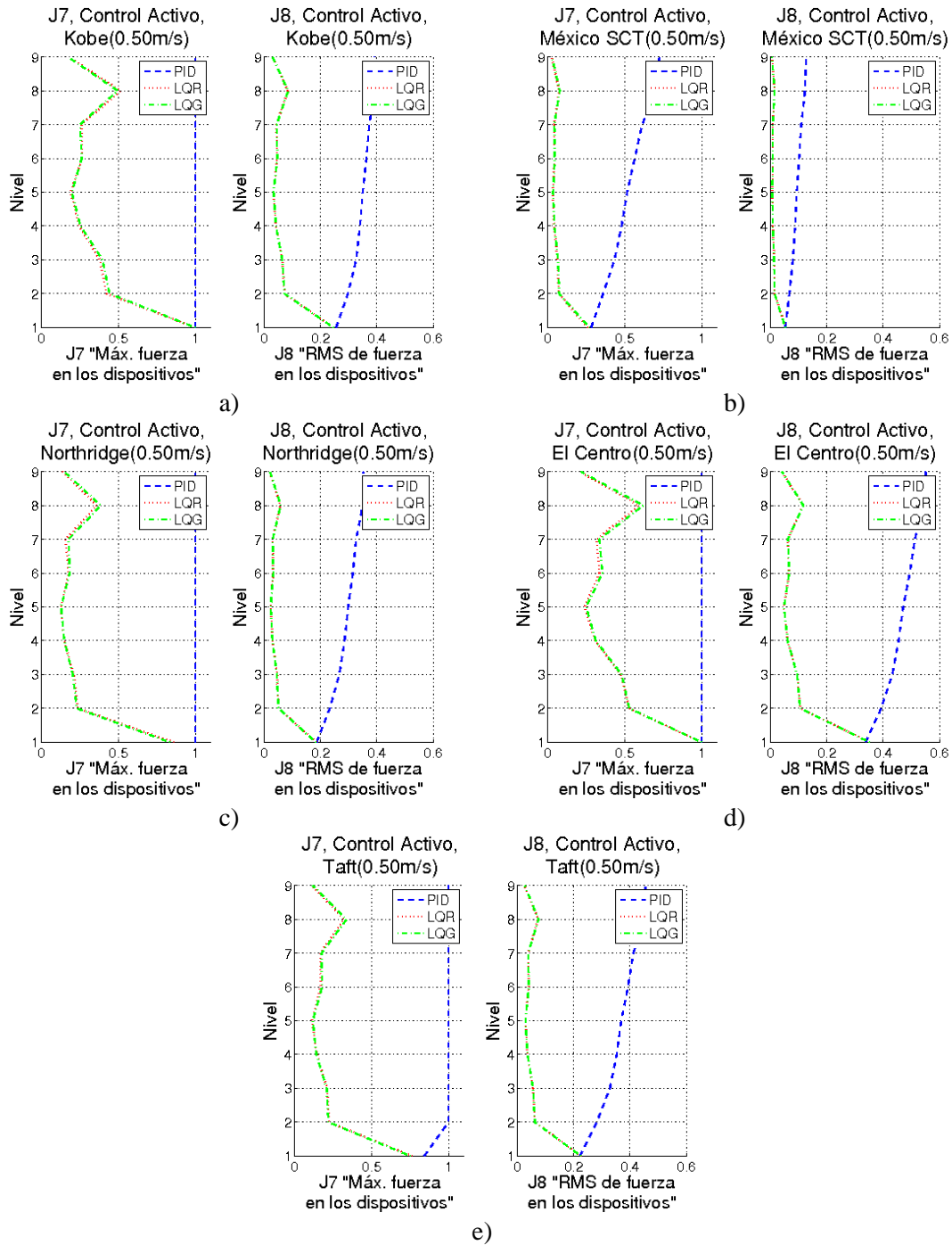


Figura 6.12.- Gráfica de J7 y J8 para el marco de nueve niveles en control activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s

Tabla 6.18.- Resumen de los índices J7 y J8 de la estructura de nueve niveles en control activo

Escala del registro	Registro		J7 Máxima fuerza en los dispositivos			J8 Norma de la fuerza en los dispositivos		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	max	1.0000	1.0000	1.0000	0.3925	0.2461	0.2461
		min	1.0000	0.1802	0.1722	0.2555	0.0291	0.0298
		prom	1.0000	0.3834	0.3853	0.3433	0.0733	0.0738
	Mexico SCT	max	0.7253	0.2587	0.2697	0.1266	0.0542	0.0529
		min	0.2819	0.0254	0.0269	0.0529	0.0052	0.0051
		prom	0.5195	0.0716	0.0752	0.0935	0.0150	0.0147
	Northridge	max	1.0000	0.8618	0.8342	0.3528	0.1855	0.1830
		min	1.0000	0.1254	0.1271	0.1864	0.0202	0.0208
		prom	1.0000	0.2676	0.2703	0.2905	0.0528	0.0526
	El Centro	max	1.0000	1.0000	1.0000	0.5515	0.3525	0.3515
		min	1.0000	0.2085	0.2145	0.3380	0.0402	0.0405
		prom	1.0000	0.4445	0.4551	0.4660	0.1053	0.1052
	Taft	max	1.0000	0.7650	0.7528	0.4558	0.2272	0.2258
		min	0.8430	0.1113	0.1171	0.2225	0.0257	0.0263
		prom	0.9826	0.2472	0.2497	0.3627	0.0654	0.0656
0.25 m/s	Kobe	max	1.0000	0.7587	0.7988	0.2743	0.1304	0.1305
		min	0.7858	0.0901	0.0861	0.1316	0.0145	0.0148
		prom	0.9762	0.2204	0.2258	0.2173	0.0374	0.0376
	Mexico SCT	max	0.3607	0.1294	0.1348	0.0629	0.0271	0.0265
		min	0.1398	0.0127	0.0135	0.0263	0.0026	0.0025
		prom	0.2579	0.0358	0.0376	0.0465	0.0075	0.0073
	Northridge	max	1.0000	0.4309	0.4171	0.2031	0.0927	0.0915
		min	0.4840	0.0627	0.0636	0.0878	0.0101	0.0104
		prom	0.8333	0.1338	0.1352	0.1516	0.0264	0.0263
	El Centro	max	1.0000	0.9474	0.9432	0.3600	0.1907	0.1900
		min	1.0000	0.1040	0.1081	0.1776	0.0200	0.0201
		prom	1.0000	0.2706	0.2759	0.2856	0.0540	0.0540
	Taft	max	1.0000	0.3825	0.3764	0.2569	0.1136	0.1129
		min	0.4116	0.0556	0.0585	0.1082	0.0129	0.0132
		prom	0.7744	0.1236	0.1248	0.1901	0.0327	0.0328
			J _i mayores a 1		Controlador con menor J _i máximo			
			Controlador con mayor reducción de J _i					
			Controlador con menor J _i ; promedio de todos los niveles					

En la figura 6.12 y en la tabla 6.18 se muestran los resultados de la fuerza máxima (J7) y la norma de la fuerza (J8) del marco de nueve niveles con control activo. Una vez más la energía ocupada es menor para los algoritmos LQR Y LQG. En todos los registros, el control PID alcanza el límite máximo para todos los dispositivos, con excepción de los dispositivos evaluados con el registro de México SCT y del dispositivo en el primer nivel con el registro de Taft.

Cabe mencionar que para la estructura de nueve niveles tanto con control activo y semi-activo, la demanda que ejerce el registro de Mexico SCT es mínima. Ya que el promedio de la fuerza aplicada por los dispositivos, evaluada con el índice J8, se mantiene por debajo del 13 % y del 7% de su capacidad máxima para el registro escalado a 0.5m/s y 0.25m/s respectivamente.

6.2.3 Marco de 20 Niveles.

Las variaciones de los índices de desempeño para el marco de 20 niveles se muestran en las figuras 6.13 a 6.15 con los controladores semi-activos. Para actuadores activos la variación de cada índice se mostrará en las figuras 6.16 a 6.18. En las tablas 6.19 a 6.21 se resumen los índices de desempeño para la estructura de 20 niveles con dispositivos semi-activos y en las tablas 6.22 a 6.24 se hace para actuadores activos.

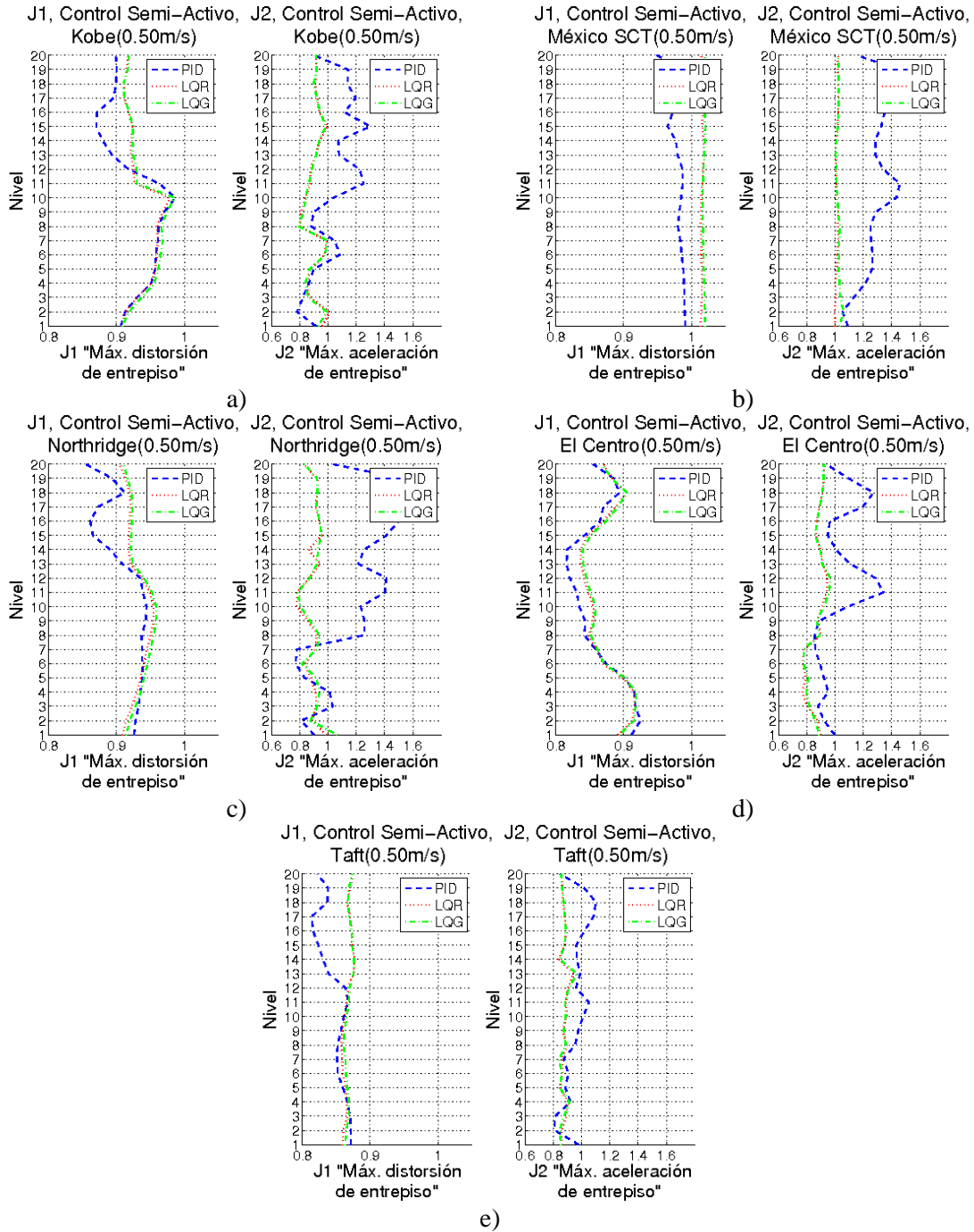


Figura 6.13.- Gráfica de J1 y J2 para el marco de 20 niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s

Tabla 6.19.- Resumen de los índices J1, J2 y J3 de la estructura de 20 niveles en control semi-activo

Escala del registro	Registro		J1 Máxima distorsión de entepiso			J2 Máxima aceleración de entepiso			J3 Máximo cortante basal		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	max	0.9867	0.9790	0.9857	1.3001	1.0100	0.9915	0.9248	0.9189	0.9200
		min	0.8701	0.9077	0.9081	0.7801	0.7980	0.7900			
		prom	0.9243	0.9339	0.9374	1.0316	0.9088	0.9045			
	Mexico SCT	max	0.9996	1.0182	1.0205	1.6560	1.0219	1.0584	0.9951	1.0147	1.0201
		min	0.9484	1.0136	1.0169	1.0519	0.9962	1.0030			
		prom	0.9829	1.0157	1.0189	1.3074	1.0117	1.0233			
	Northridge	max	0.9443	0.9549	0.9586	1.7540	0.9835	1.0654	0.9294	0.9107	0.9162
		min	0.8545	0.9051	0.9101	0.7686	0.7786	0.7852			
		prom	0.9147	0.9289	0.9331	1.2013	0.8901	0.9029			
	El Centro	max	0.9250	0.9159	0.9185	1.3426	0.9440	0.9663	0.9057	0.8969	0.8995
		min	0.8159	0.8365	0.8399	0.8551	0.7675	0.7764			
		prom	0.8660	0.8725	0.8748	1.0196	0.8718	0.8748			
	Taft	max	0.8718	0.8771	0.8763	1.1011	0.9439	0.9666	0.8762	0.8590	0.8632
		min	0.8137	0.8574	0.8609	0.8113	0.8393	0.8407			
		prom	0.8483	0.8665	0.8683	0.9562	0.8778	0.8765			
0.25 m/s	Kobe	max	0.9715	0.9814	0.9911	1.4355	0.9964	0.9851	0.9285	0.9010	0.9081
		min	0.8762	0.8824	0.8948	0.7856	0.7823	0.7595			
		prom	0.9228	0.9213	0.9301	1.0644	0.8830	0.8803			
	Mexico SCT	max	1.0039	1.0108	1.0159	1.6837	1.0144	1.0529	0.9932	1.0116	1.0164
		min	0.9541	1.0062	1.0117	1.0259	0.9929	0.9995			
		prom	0.9830	1.0080	1.0133	1.2450	1.0051	1.0169			
	Northridge	max	0.9479	0.9361	0.9415	1.7936	0.9835	1.0654	0.9281	0.9078	0.9138
		min	0.8634	0.8687	0.8733	0.7841	0.7778	0.7824			
		prom	0.9146	0.9067	0.9120	1.1652	0.8796	0.8914			
	El Centro	max	0.9284	0.9029	0.9091	1.3820	0.9677	0.9843	0.9078	0.8813	0.8878
		min	0.8109	0.8104	0.8189	0.8312	0.7606	0.7753			
		prom	0.8642	0.8585	0.8650	1.0210	0.8669	0.8739			
	Taft	max	0.8628	0.8520	0.8570	1.4185	0.9247	0.9440	0.8650	0.8527	0.8577
		min	0.8164	0.8260	0.8329	0.8123	0.8055	0.8104			
		prom	0.8434	0.8388	0.8442	0.9983	0.8450	0.8496			
			J _i mayores a 1			Controlador con menor J _i máximo					
			Controlador con mayor reducción de J _i								
			Controlador con menor J _i ; promedio de todos los niveles								

En este caso de la estructura de 20 niveles con dispositivos semi-activos (Figura 6.13 y Tabla 6.19) existen varios índices con valores mayores a la unidad. Dichos valores en los que se presenta un aumento en lugar de reducción, son principalmente en el registro de México SCT. La razón puede ser que es un edificio diseñado para registros sísmicos de California, EU y no para un registro característico de la Ciudad de México. Destacando también el aumento en las aceleraciones máximas con el algoritmo PID en todos los registros. De las gráficas de la figura 6.13 se puede observar que se reduce la brecha entre los algoritmos, que se podía observar en estructuras de 3 y 9 niveles,

Además, la variación en altura de los índices J1 y J2, se puede decir que es más estable con los algoritmos LQR Y LQG.

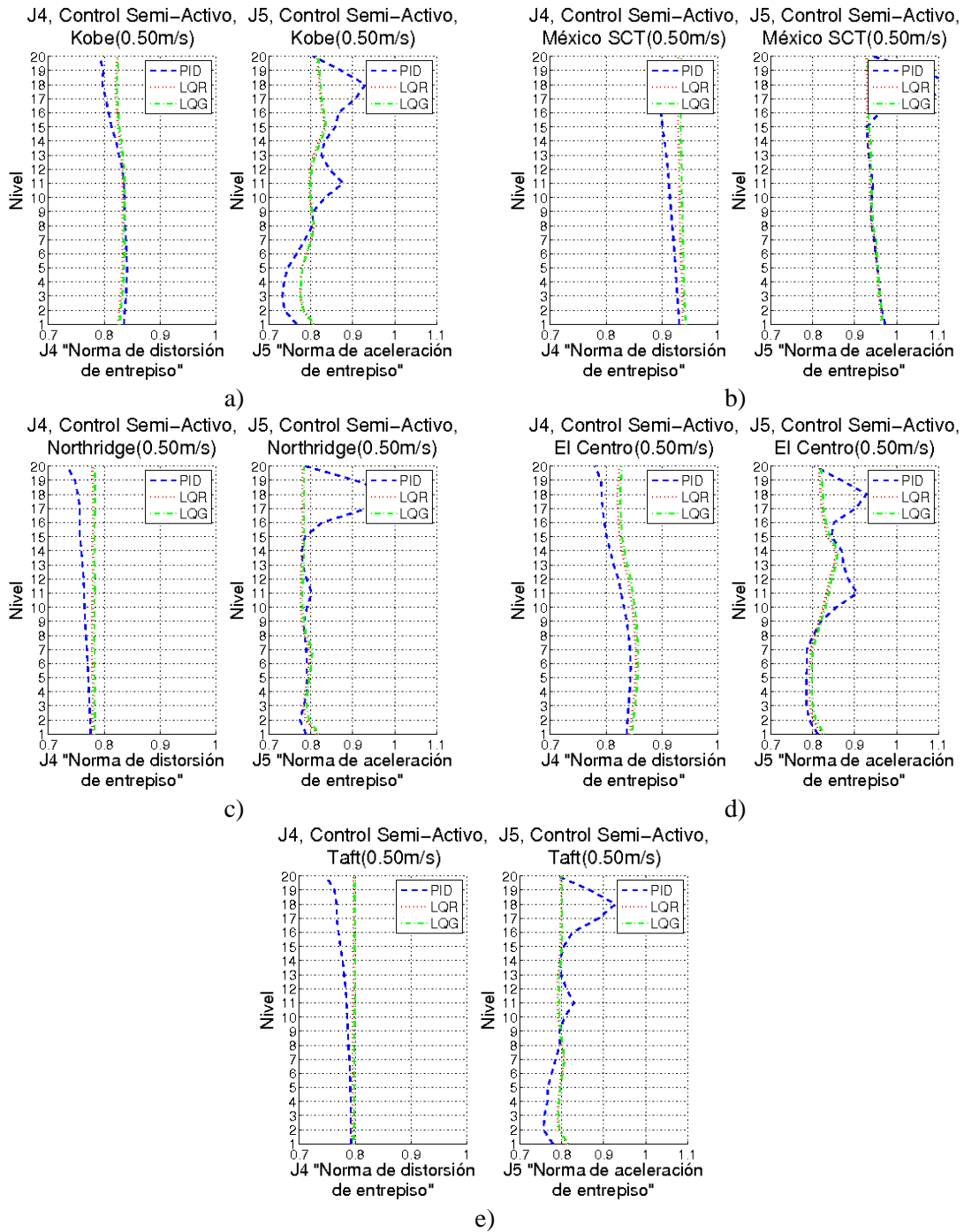


Figura 6.14.- Gráfica de J4 y J5 para el marco de 20 niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s

Tabla 6.20.- Resumen de los índices J4, J5 y J6 de la estructura de 20 niveles en control semi-activo

Escala del registro	Registro		J4 Norma de la Distorsión de entrepiso			J5 Norma de aceleración de entrepiso			J6 Norma del cortante basal		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	max	0.8411	0.8337	0.8370	0.9303	0.8334	0.8365	0.8387	0.8270	0.8300
		min	0.7916	0.8199	0.8225	0.7321	0.7747	0.7762			
		prom	0.8255	0.8286	0.8314	0.8167	0.8038	0.8060			
	Mexico SCT	max	0.9309	0.9370	0.9426	1.1351	0.9642	0.9668	0.9344	0.9391	0.9427
		min	0.8834	0.9288	0.9332	0.9294	0.9288	0.9328			
		prom	0.9124	0.9319	0.9365	0.9690	0.9413	0.9448			
	Northridge	max	0.7760	0.7794	0.7835	0.9928	0.8141	0.8194	0.7798	0.7810	0.7849
		min	0.7335	0.7784	0.7823	0.7739	0.7753	0.7800			
		prom	0.7630	0.7791	0.7831	0.8127	0.7843	0.7894			
	El Centro	max	0.8441	0.8536	0.8576	0.9286	0.8564	0.8609	0.8405	0.8449	0.8488
		min	0.7803	0.8197	0.8248	0.7854	0.7922	0.7982			
		prom	0.8212	0.8387	0.8431	0.8372	0.8177	0.8229			
Taft	max	0.7928	0.7966	0.7998	0.9281	0.8128	0.8152	0.7961	0.7961	0.7995	
	min	0.7479	0.7940	0.7973	0.7567	0.7897	0.7920				
	prom	0.7809	0.7957	0.7990	0.8063	0.7963	0.7991				
0.25 m/s	Kobe	max	0.8420	0.8223	0.8277	0.9500	0.8217	0.8277	0.8396	0.8148	0.8198
		min	0.7938	0.8076	0.8135	0.7337	0.7581	0.7649			
		prom	0.8267	0.8167	0.8220	0.8195	0.7893	0.7958			
	Mexico SCT	max	0.9315	0.9354	0.9414	1.1342	0.9625	0.9654	0.9349	0.9376	0.9413
		min	0.8868	0.9270	0.9316	0.9294	0.9270	0.9312			
		prom	0.9134	0.9302	0.9350	0.9691	0.9397	0.9435			
	Northridge	max	0.7814	0.7634	0.7684	1.0130	0.8106	0.8163	0.7850	0.7633	0.7680
		min	0.7421	0.7607	0.7653	0.7792	0.7605	0.7659			
		prom	0.7689	0.7619	0.7667	0.8178	0.7723	0.7780			
	El Centro	max	0.8476	0.8386	0.8438	0.9407	0.8421	0.8484	0.8438	0.8300	0.8350
		min	0.7863	0.8061	0.8124	0.7890	0.7793	0.7864			
		prom	0.8253	0.8241	0.8298	0.8418	0.8044	0.8110			
Taft	max	0.7910	0.7696	0.7741	0.9918	0.7850	0.7917	0.7942	0.7693	0.7737	
	min	0.7498	0.7666	0.7709	0.7527	0.7591	0.7660				
	prom	0.7790	0.7688	0.7732	0.8136	0.7682	0.7735				
			J _i mayores a 1		Controlador con menor J _i máximo						
			Controlador con mayor reducción de J _i								
			Controlador con menor J _i ; promedio de todos los niveles								

En la figura 6.14 y tabla 6.20 se presentan los índices J4, J5 y J6 para el marco de 20 niveles semi-activo. Al evaluar la norma de distorsión (J4), el controlador PID presenta mejores resultados en registros escalados a 0.5 m/s. Sin embargo, existe mayor reducción del índice J4 con el algoritmo LQR para registros escalados a 0.25 m/s. Cuando se trata de la norma de aceleración, el algoritmo que tiene mayor reducción de la respuesta es el LQR. La mayor reducción para el cortante basal se presenta en los algoritmos PID y LQR, aunque la diferencia entre los resultados no varía en más del 2.5%

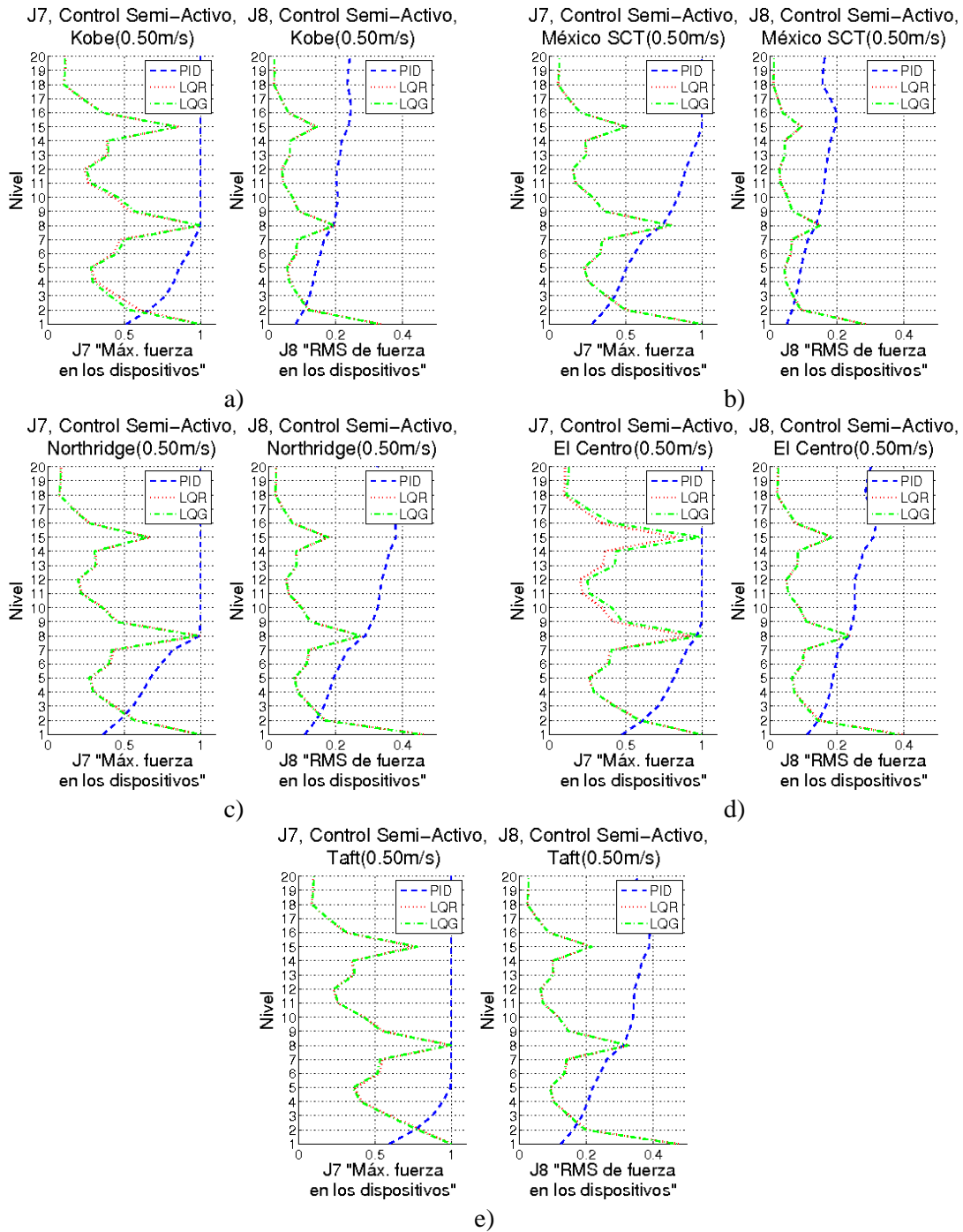


Figura 6.15.- Gráfica de J7 y J8 para el marco de 20 niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s

Tabla 6.21.- Resumen de los índices J7 y J8 de la estructura de 20 niveles en control semi-activo

Escala del registro	Registro		J7			J8		
			Máxima fuerza en los dispositivos			Norma de la fuerza en los dispositivos		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	max	1.0000	1.0000	1.0000	0.2451	0.3358	0.3306
		min	0.5124	0.1022	0.1028	0.0811	0.0161	0.0164
		prom	0.9255	0.4282	0.4281	0.1895	0.0851	0.0842
	Mexico SCT	max	1.0000	1.0000	1.0000	0.1995	0.2853	0.2819
		min	0.2788	0.0548	0.0553	0.0507	0.0103	0.0101
		prom	0.7633	0.3151	0.3140	0.1385	0.0640	0.0632
	Northridge	max	1.0000	1.0000	1.0000	0.3808	0.4629	0.4562
		min	0.3581	0.0741	0.0725	0.1082	0.0197	0.0195
		prom	0.8613	0.3826	0.3746	0.2799	0.1154	0.1139
	El Centro	max	1.0000	1.0000	1.0000	0.3178	0.3957	0.3833
		min	0.4764	0.0949	0.1123	0.1116	0.0211	0.0215
		prom	0.9057	0.3927	0.4325	0.2397	0.1037	0.1027
	Taft	max	1.0000	1.0000	1.0000	0.3890	0.4758	0.4707
		min	0.5939	0.0831	0.0853	0.1236	0.0239	0.0239
		prom	0.9587	0.4475	0.4459	0.2985	0.1334	0.1321
0.25 m/s	Kobe	max	0.7973	0.9584	0.8457	0.1292	0.1936	0.1875
		min	0.2510	0.0509	0.0514	0.0395	0.0079	0.0081
		prom	0.5934	0.2393	0.2357	0.0956	0.0434	0.0429
	Mexico SCT	max	0.5644	0.8001	0.7998	0.0991	0.1505	0.1483
		min	0.1377	0.0273	0.0276	0.0251	0.0051	0.0051
		prom	0.3939	0.1715	0.1713	0.0686	0.0324	0.0319
	Northridge	max	0.7619	0.9138	0.8943	0.1948	0.2682	0.2637
		min	0.1734	0.0374	0.0365	0.0510	0.0096	0.0095
		prom	0.5168	0.2116	0.2068	0.1372	0.0585	0.0577
	El Centro	max	0.7264	0.9650	0.9628	0.1590	0.2345	0.2258
		min	0.2261	0.0474	0.0562	0.0539	0.0104	0.0106
		prom	0.5141	0.2187	0.2388	0.1177	0.0530	0.0524
	Taft	max	0.9257	1.0000	1.0000	0.2136	0.3079	0.3036
		min	0.2895	0.0422	0.0438	0.0597	0.0115	0.0115
		prom	0.6610	0.2522	0.2518	0.1537	0.0685	0.0678
J _i mayores a 1			Controlador con menor J _i máximo					
			Controlador con mayor reducción de J _i					
			Controlador con menor J _i ; promedio de todos los niveles					

Los resultados del marco de 20 niveles semi- activo evaluando J7 y J8 se muestran en la Figura 6.15 y en la Tabla 6.21. La fuerza requerida máxima (J7) alcanza los límites en los dispositivos por encima del Nivel 6, para los registros de Kobe (0.5m/s), Northridge (0.5m/s), El Centro (0.5m/s) y Taft (0.5m/s). Generalmente los algoritmos LQR y LQG presentan mayor ahorro de energía a lo largo de la estructura. Cabe destacar que en las gráficas de la Figura 6.15 estos dos últimos controladores presentan valores máximos de la fuerza aplicada, peculiarmente en los niveles 1, 8 y 15 para todos los registros sísmicos.

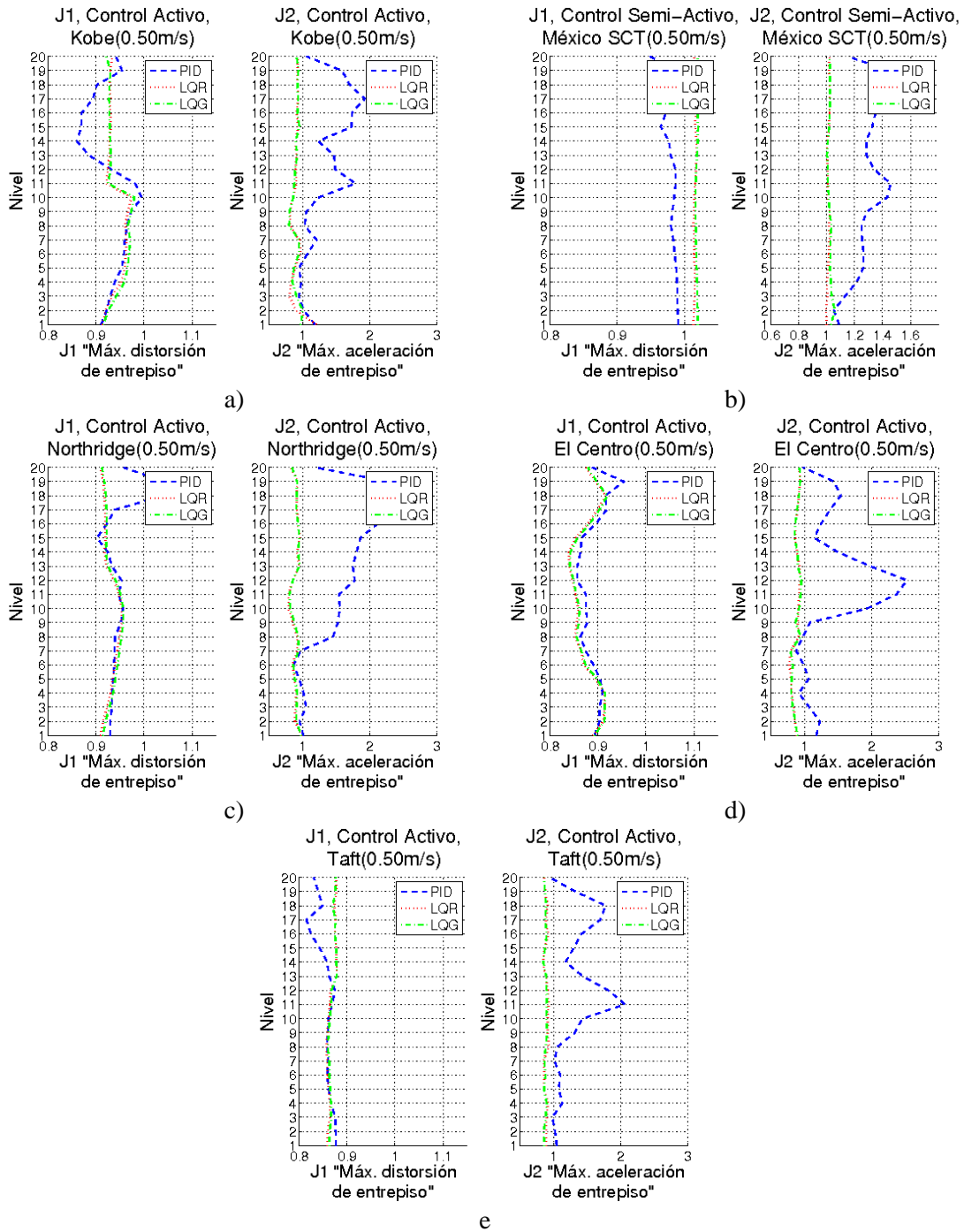


Figura 6.16.- Gráfica de J1 y J2 para el marco de 20 niveles en control activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s

Tabla 6.22.- Resumen de los índices J1, J2 y J3 de la estructura de 20 niveles en control activo

Escala del registro	Registro		J1 Máxima distorsión de entrepiso			J2 Máxima aceleración de entrepiso			J3 Máximo cortante basal		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	max	0.9955	0.9735	0.9802	1.9309	1.2056	1.0051	0.9213	0.9159	0.9187
		min	0.8598	0.9126	0.9147	0.9446	0.8078	0.8010			
		prom	0.9295	0.9393	0.9421	1.3226	0.9127	0.9089			
	Mexico SCT	max	1.1224	1.0181	1.0206	2.6988	1.0218	1.0285	0.9946	1.0147	1.0187
		min	0.9667	1.0137	1.0168	1.1447	0.9808	0.9898			
		prom	0.9968	1.0157	1.0189	1.5986	1.0105	1.0159			
	Northridge	max	1.0421	0.9532	0.9566	2.6493	0.9918	0.9835	0.9325	0.9106	0.9161
		min	0.9015	0.9089	0.9118	0.8679	0.7953	0.8065			
		prom	0.9472	0.9284	0.9323	1.5458	0.8962	0.9047			
	El Centro	max	0.9540	0.9167	0.9193	2.5327	0.9381	0.9582	0.8891	0.8942	0.8990
		min	0.8562	0.8390	0.8414	0.8802	0.7747	0.7949			
		prom	0.8890	0.8759	0.8786	1.3743	0.8800	0.8838			
	Taft	max	0.8761	0.8788	0.8784	2.0691	0.9328	0.9084	0.8796	0.8570	0.8616
		min	0.8150	0.8569	0.8597	0.9503	0.8439	0.8495			
		prom	0.8559	0.8672	0.8688	1.3104	0.8934	0.8821			
0.25 m/s	Kobe	max	0.9915	0.9744	0.9855	1.7243	1.4556	1.6087	0.9351	0.9045	0.9132
		min	0.9021	0.8923	0.9021	0.9394	0.8442	0.8123			
		prom	0.9479	0.9256	0.9342	1.2717	0.9465	0.9489			
	Mexico SCT	max	1.0061	1.0108	1.0162	2.0468	1.0138	1.0534	0.9939	1.0116	1.0152
		min	0.9668	1.0062	1.0117	1.1501	0.9904	0.9965			
		prom	0.9841	1.0080	1.0133	1.4768	1.0048	1.0143			
	Northridge	max	0.9591	0.9345	0.9396	2.5241	0.9918	0.9835	0.9301	0.9079	0.9137
		min	0.8740	0.8724	0.8757	0.8566	0.7953	0.8065			
		prom	0.9268	0.9062	0.9113	1.4751	0.8864	0.8990			
	El Centro	max	0.9330	0.9153	0.9264	1.8207	0.9425	0.9449	0.9152	0.8795	0.8861
		min	0.8509	0.8163	0.8233	0.8607	0.7719	0.7926			
		prom	0.8837	0.8620	0.8704	1.2271	0.8720	0.8791			
	Taft	max	0.9305	0.8516	0.8565	1.5574	0.9027	0.8850	0.8598	0.8521	0.8574
		min	0.8490	0.8254	0.8317	0.8843	0.8087	0.8245			
		prom	0.8593	0.8392	0.8445	1.1756	0.8481	0.8574			
			J _i mayores a 1		Controlador con menor J _i máximo						
			Controlador con mayor reducción de J _i								
			Controlador con menor J _i ; promedio de todos los niveles								

Analizando la Tabla 6.22 correspondiente al marco de 20 niveles activo, se observa que el controlador PID no funciona para reducir la aceleración máxima. Además, en lugar de haber una reducción, la respuesta aumenta con valores de hasta J2=2.69. Para los índices de desempeño en esta estructura, todos los algoritmos presentan valores mayores a la unidad con el registro de México SCT. A pesar de las desventajas con el registro de México SCT, el algoritmo que mayor reducción de la respuesta máxima (J1, J2 y J3) es el LQR.

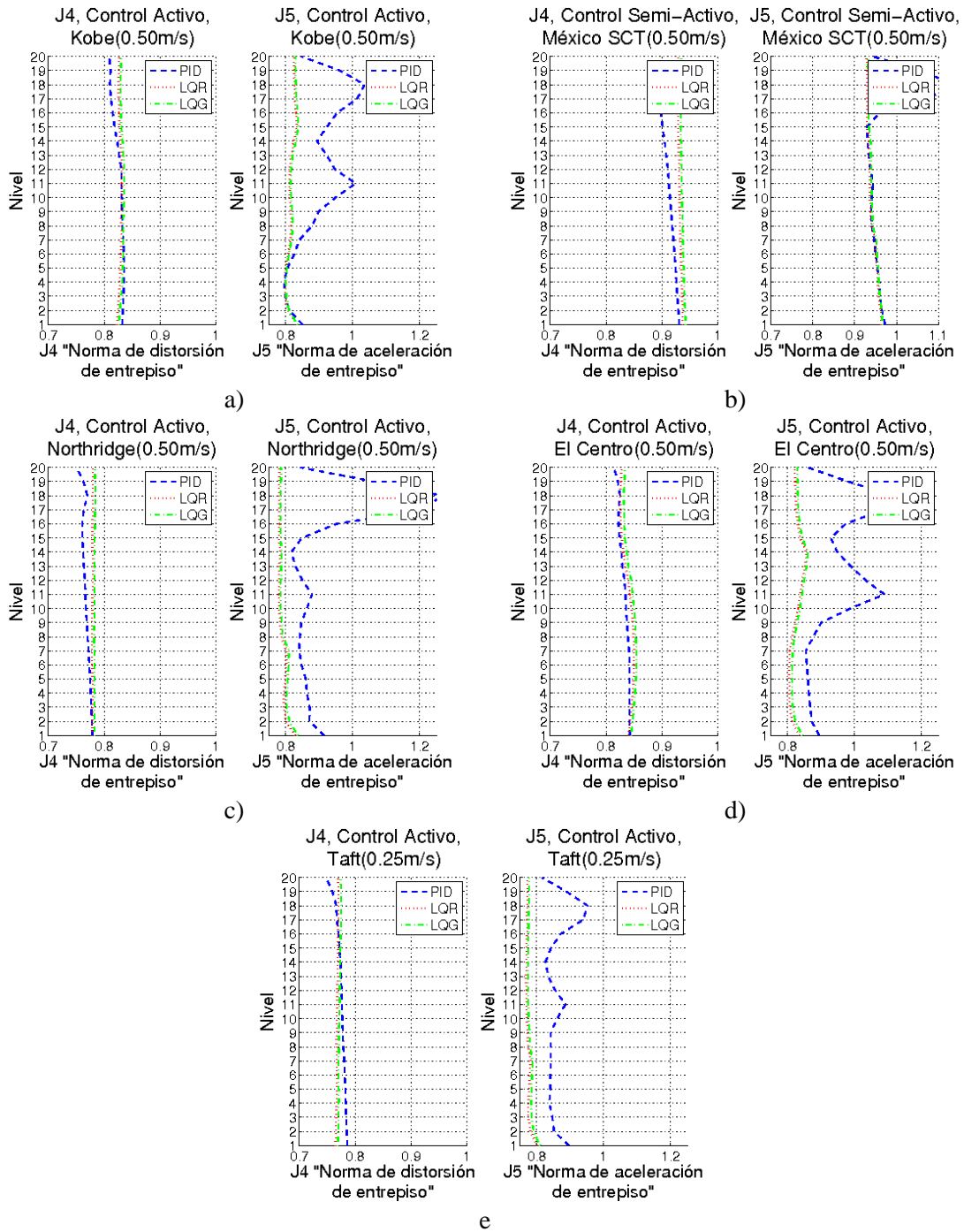


Figura 6.17.- Gráfica de J4 y J5 para el marco de 20 niveles en control activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s

Tabla 6.23.- Resumen de los índices J4, J5 y J6 de la estructura de 20 niveles en control activo

Escala del registro	Registro		J4 Norma de la Distorsión de entrepiso			J5 Norma de aceleración de entrepiso			J6 Norma del cortante basal		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	max	0.8357	0.8317	0.8361	1.0361	0.8342	0.8381	0.8362	0.8250	0.8290
		min	0.8092	0.8227	0.8261	0.7955	0.7981	0.8009			
		prom	0.8263	0.8283	0.8322	0.8979	0.8168	0.8207			
	Mexico SCT	max	0.9286	0.9370	0.9428	1.1512	0.9642	0.9669	0.9324	0.9391	0.9427
		min	0.8598	0.9288	0.9333	0.9424	0.9288	0.9329			
		prom	0.9062	0.9319	0.9366	0.9912	0.9413	0.9449			
	Northridge	max	0.7794	0.7799	0.7843	1.2648	0.8281	0.8361	0.7836	0.7807	0.7846
		min	0.7504	0.7782	0.7821	0.8172	0.7794	0.7844			
		prom	0.7682	0.7790	0.7831	0.9089	0.7890	0.7950			
	El Centro	max	0.8425	0.8502	0.8546	1.1145	0.8566	0.8610	0.8468	0.8434	0.8478
		min	0.8141	0.8248	0.8314	0.8553	0.8049	0.8132			
		prom	0.8331	0.8388	0.8440	0.9419	0.8249	0.8320			
Taft	max	0.7978	0.7980	0.8015	1.1893	0.8299	0.8344	0.8017	0.7943	0.7975	
	min	0.7775	0.7923	0.7956	0.8518	0.7940	0.7977				
	prom	0.7905	0.7947	0.7980	0.9257	0.8030	0.8068				
0.25 m/s	Kobe	max	0.8329	0.8202	0.8264	0.9763	0.8204	0.8290	0.8367	0.8124	0.8180
		min	0.8054	0.8091	0.8144	0.8576	0.7840	0.7940			
		prom	0.8281	0.8163	0.8223	0.9111	0.8031	0.8120			
	Mexico SCT	max	0.9291	0.9354	0.9416	1.1017	0.9626	0.9655	0.9329	0.9376	0.9414
		min	0.8571	0.9270	0.9317	0.9434	0.9270	0.9313			
		prom	0.9065	0.9302	0.9351	0.9833	0.9398	0.9436			
	Northridge	max	0.7809	0.7641	0.7693	0.9845	0.8248	0.8332	0.7847	0.7631	0.7677
		min	0.7302	0.7605	0.7651	0.8107	0.7636	0.7686			
		prom	0.7663	0.7618	0.7666	0.8623	0.7771	0.7838			
	El Centro	max	0.8409	0.8353	0.8407	0.9925	0.8422	0.8491	0.8452	0.8284	0.8339
		min	0.8074	0.8107	0.8192	0.8475	0.7912	0.8020			
		prom	0.8317	0.8242	0.8307	0.9013	0.8112	0.8206			
Taft	max	0.7861	0.7705	0.7755	0.9520	0.8010	0.8100	0.7899	0.7676	0.7719	
	min	0.7480	0.7650	0.7693	0.8163	0.7687	0.7741				
	prom	0.7751	0.7679	0.7723	0.8609	0.7748	0.7811				
			J _i mayores a 1			Controlador con menor J _i máximo					
			Controlador con mayor reducción de J _i								
			Controlador con menor J _i : promedio de todos los niveles								

En la figura 6.17 y Tabla 6.23 se presentan los índices J4, J5 y J6 de la estructura de 20 niveles con control activo. Al evaluar el índice J4, es que el algoritmo con mejor desempeño es el PID con algunas excepciones siendo mejor el LQR. A pesar de esto, la diferencia de J4 entre estos dos algoritmos no varía en $\pm 6.9\%$. Cuando se observan los valores de la reducción en la norma de aceleración (J5) el algoritmo que más reduce este valor es el LQR. Al igual que en J5, en la norma del cortante basal (J6) se ve la mayor reducción con el controlador LQR.

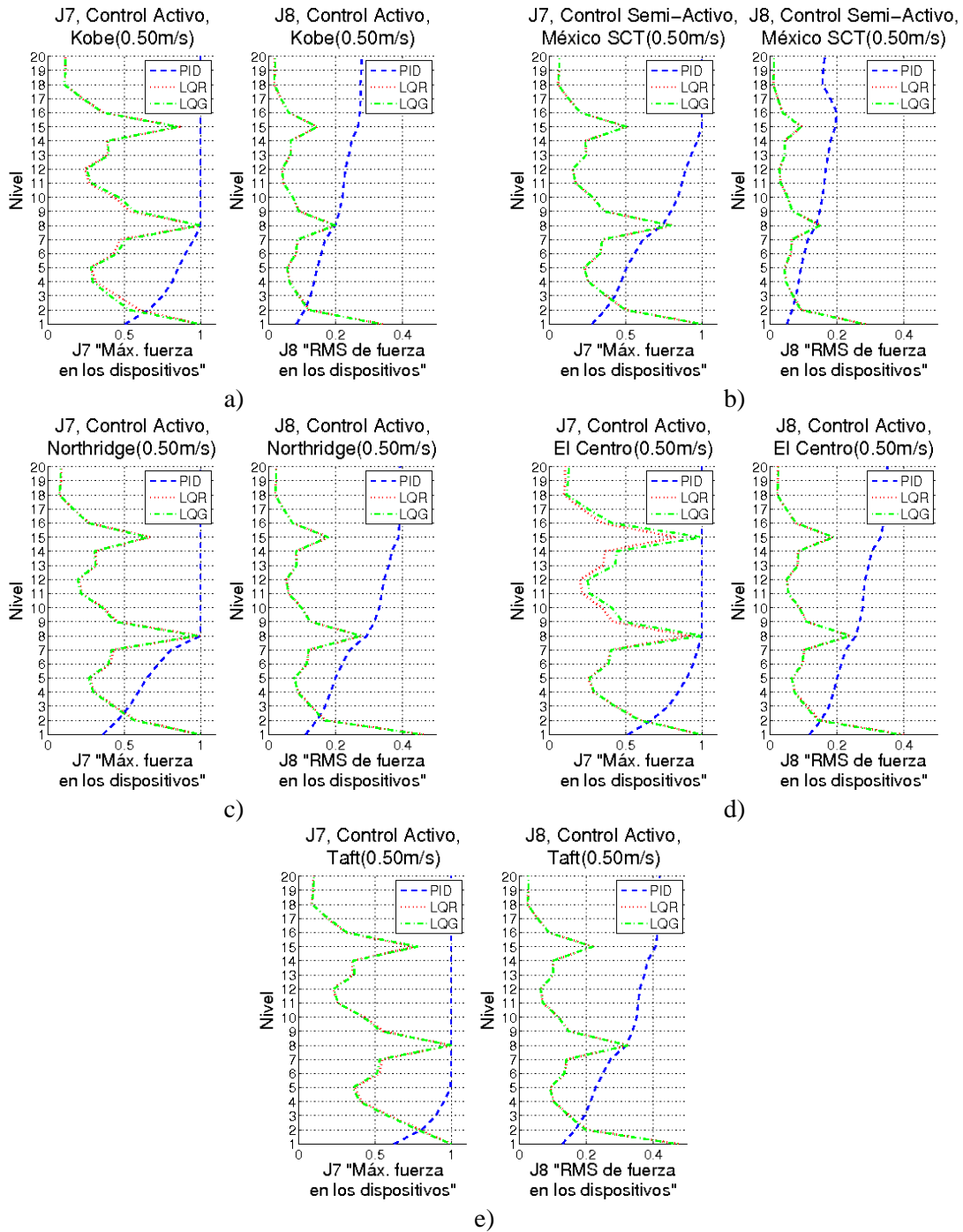


Figura 6.18.- Gráfica de J7 y J8 para el marco de 20 niveles en control activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s

El ahorro de energía para el control activo del marco de 20 niveles se presenta en la Figura 6.18 y en la tabla 6.24. Se puede observar que para los registros sísmicos escalados a 0.5 m/s, J7 alcanza su límite máximo con los tres algoritmos. El mejor desempeño evaluando J7 Y J8 se encuentra con los algoritmos LQR y LQG. Al igual que en el control semi-activo, en el control activo del marco de 20 niveles se presentan picos de la fuerza máxima y en su norma, peculiarmente en los niveles 1, 8 y 15.

Tabla 6.24.- Resumen de los índices J7 y J8 de la estructura de 20 niveles en control activo

Escala del registro	Registro		J7 Máxima fuerza en los dispositivos			J8 Norma de la fuerza en los dispositivos		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	max	1.0000	1.0000	1.0000	0.2787	0.3394	0.3354
		min	0.5050	0.1045	0.1049	0.0831	0.0165	0.0167
		prom	0.9222	0.4296	0.4299	0.2071	0.0859	0.0851
	Mexico SCT	max	1.0000	1.0000	1.0000	0.1985	0.2853	0.2819
		min	0.2787	0.0548	0.0552	0.0511	0.0103	0.0101
		prom	0.7619	0.3151	0.3140	0.1454	0.0641	0.0632
	Northridge	max	1.0000	1.0000	1.0000	0.3949	0.4634	0.4569
		min	0.3584	0.0751	0.0733	0.1107	0.0198	0.0196
		prom	0.8558	0.3825	0.3743	0.2986	0.1155	0.1140
	El Centro	max	1.0000	1.0000	1.0000	0.3508	0.3990	0.3886
		min	0.5155	0.0959	0.1125	0.1182	0.0215	0.0219
		prom	0.9313	0.3924	0.4332	0.2651	0.1044	0.1035
	Taft	max	1.0000	1.0000	1.0000	0.4193	0.4762	0.4722
		min	0.6237	0.0832	0.0855	0.1284	0.0244	0.0244
		prom	0.9639	0.4471	0.4450	0.3212	0.1338	0.1325
0.25 m/s	Kobe	max	0.8100	0.9582	0.8469	0.1435	0.1946	0.1897
		min	0.2514	0.0523	0.0525	0.0416	0.0081	0.0083
		prom	0.6043	0.2402	0.2368	0.1043	0.0438	0.0433
	Mexico SCT	max	0.5654	0.8001	0.7999	0.0987	0.1505	0.1484
		min	0.1411	0.0273	0.0276	0.0253	0.0051	0.0051
		prom	0.3949	0.1715	0.1713	0.0721	0.0324	0.0319
	Northridge	max	0.7726	0.9150	0.8951	0.1990	0.2683	0.2639
		min	0.1749	0.0376	0.0368	0.0517	0.0097	0.0096
		prom	0.5180	0.2116	0.2067	0.1449	0.0586	0.0578
	El Centro	max	0.7615	0.9736	0.9693	0.1764	0.2359	0.2282
		min	0.2417	0.0482	0.0563	0.0567	0.0106	0.0108
		prom	0.5330	0.2190	0.2398	0.1290	0.0533	0.0528
	Taft	max	0.9236	1.0000	1.0000	0.2261	0.3078	0.3038
		min	0.3051	0.0424	0.0437	0.0613	0.0118	0.0118
		prom	0.6643	0.2520	0.2513	0.1644	0.0687	0.0680
			J _i mayores a 1		Controlador con menor J _i máximo			
			Controlador con mayor reducción de J _i					
			Controlador con menor J _i ; promedio de todos los niveles					

6.2.4 Fuerza Requerida Acumulada en cada Edificio

En la Figura 6.19 se muestran gráficas de la fuerza acumulada en todos los dispositivos semi-activos del marco de 3 niveles. Estas gráficas indican qué tanta energía fue ocupada por cada algoritmo a lo largo del tiempo en todos los registros escalados a 0.5m/s. Las gráficas de fuerza acumulada correspondientes a la escala de 0.25 m/s se muestran en el Apéndice B. Para la estructura de 3 niveles en control semi-activo el registro que más fuerza demanda es El Centro. Con una fuerza acumulada de 6.8×10^8 kgf con el algoritmo PID y 2.2×10^8 kg para los controles LQR Y LQG. En esta gráfica se ve claramente el gran consumo de energía del algoritmo PID en comparación con los 2 reguladores.

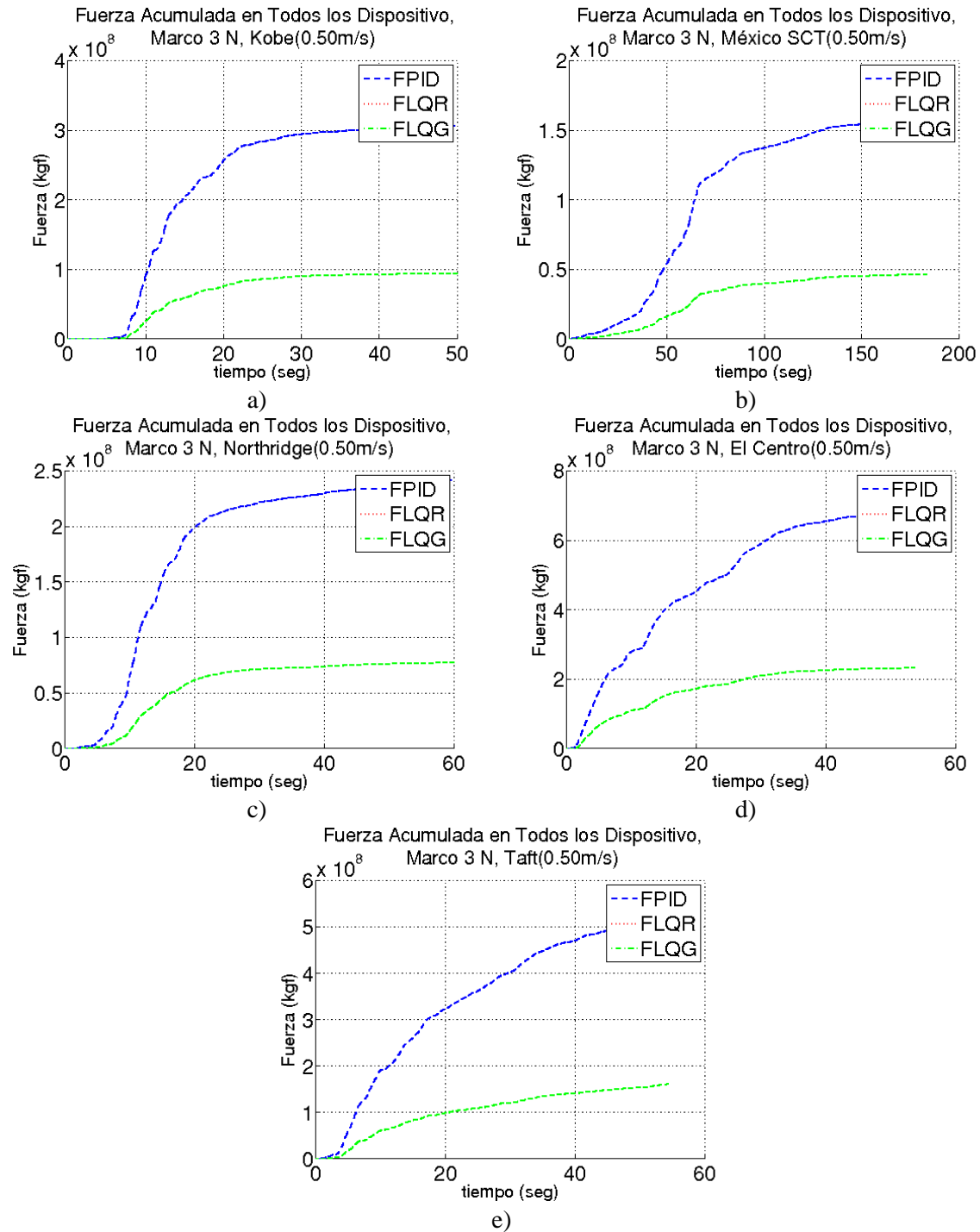


Figura 6.19.- Gráfica fuerza acumulada en los tres dispositivos del marco de tres niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s

En la Figura 6.20 se muestran los resultados de las fuerzas acumuladas para el marco de 3 niveles activo. En los 5 registros la fuerza ocupada por el controlador PID es mayor. El registro sísmico que mayor demanda de energía exige es el de El Centro, llegando a $7 \times 10^8 \text{ kgf}$ con el PID y a $2.3 \times 10^8 \text{ kgf}$ con los otros dos algoritmos.

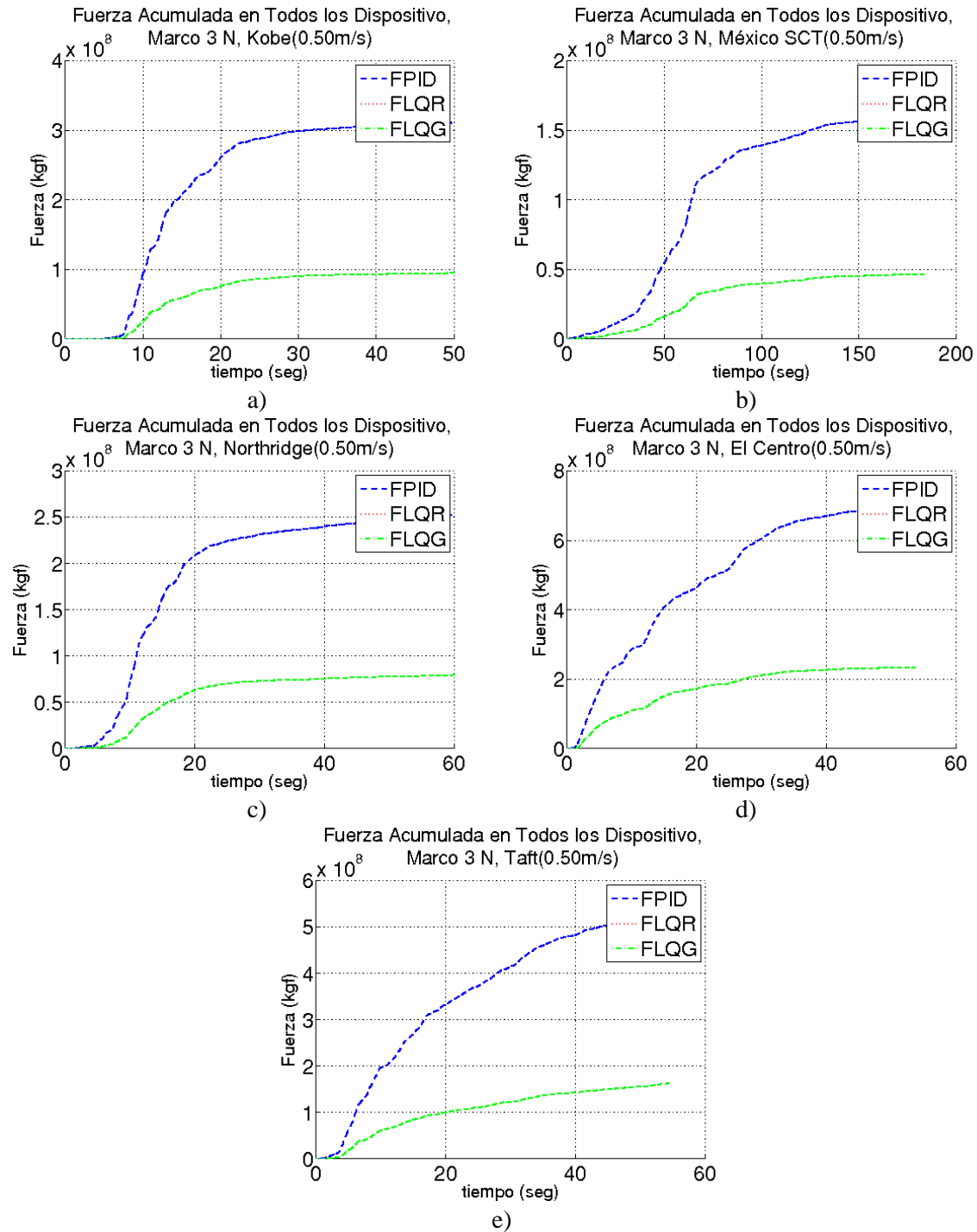


Figura 6.20.- Gráfica fuerza acumulada en los tres dispositivos del marco de tres niveles en control activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s

En las Figuras 6.21 y 6.22 se muestran las fuerzas acumuladas para todos los dispositivos del marco de 9 niveles con control semi-activo y activo respectivamente. Al igual que en el marco de 3 niveles, la demanda acumulada a lo largo del tiempo con el PID es mucho mayor que con los controladores LQR y LQG. Una vez mas el registro que mas le exige a los dispositivos es el de El Centro con hasta

3.5×10^9 kgf correspondiente al PID y 0.6×10^9 kgf con LQR y LQG . A pesar de la mayor duración en el registro de México SCT es uno de los que menos exigencia en los dispositivos tiene.

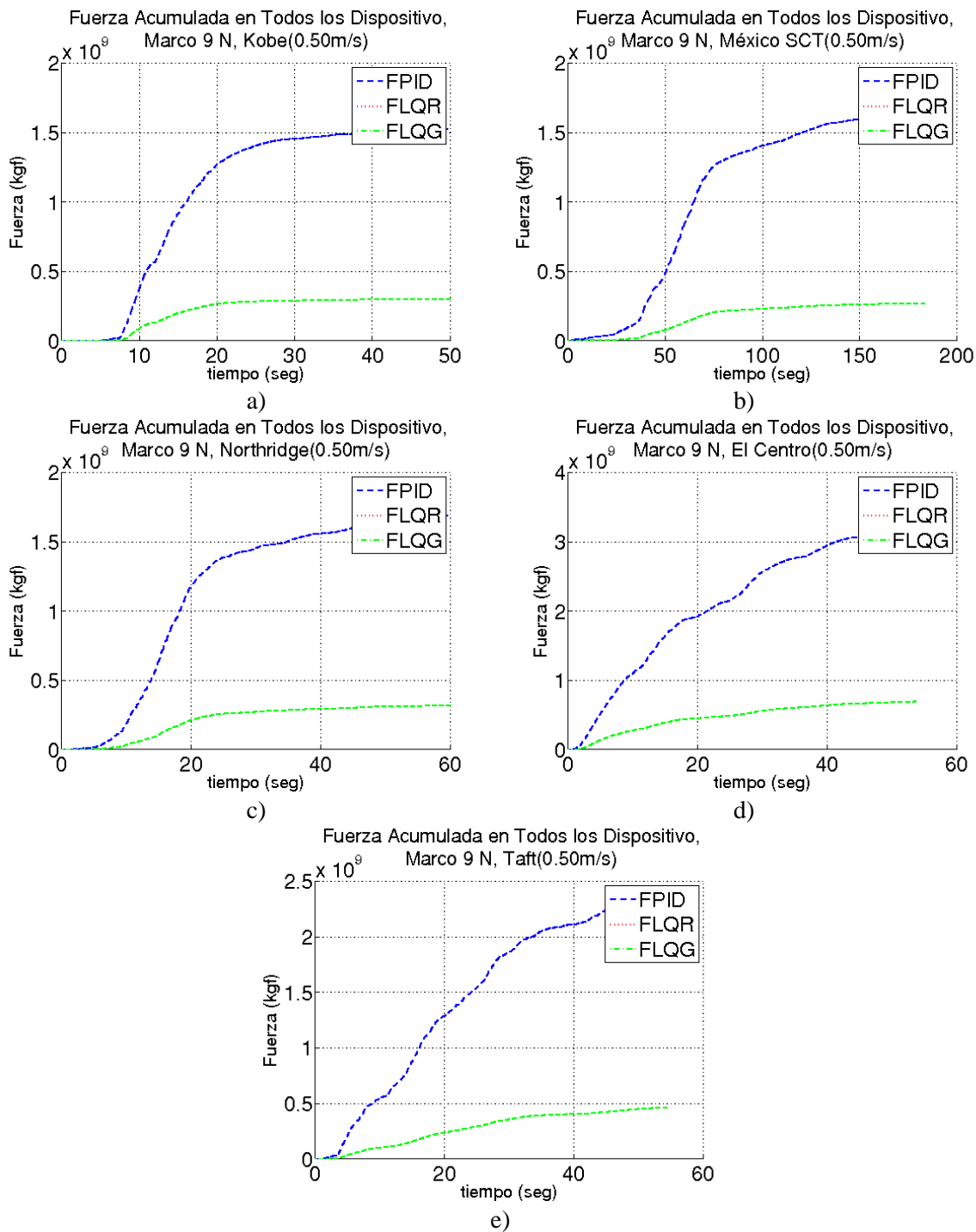


Figura 6.21.- Gráfica fuerza acumulada en los nueve dispositivos del marco de nueve niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s

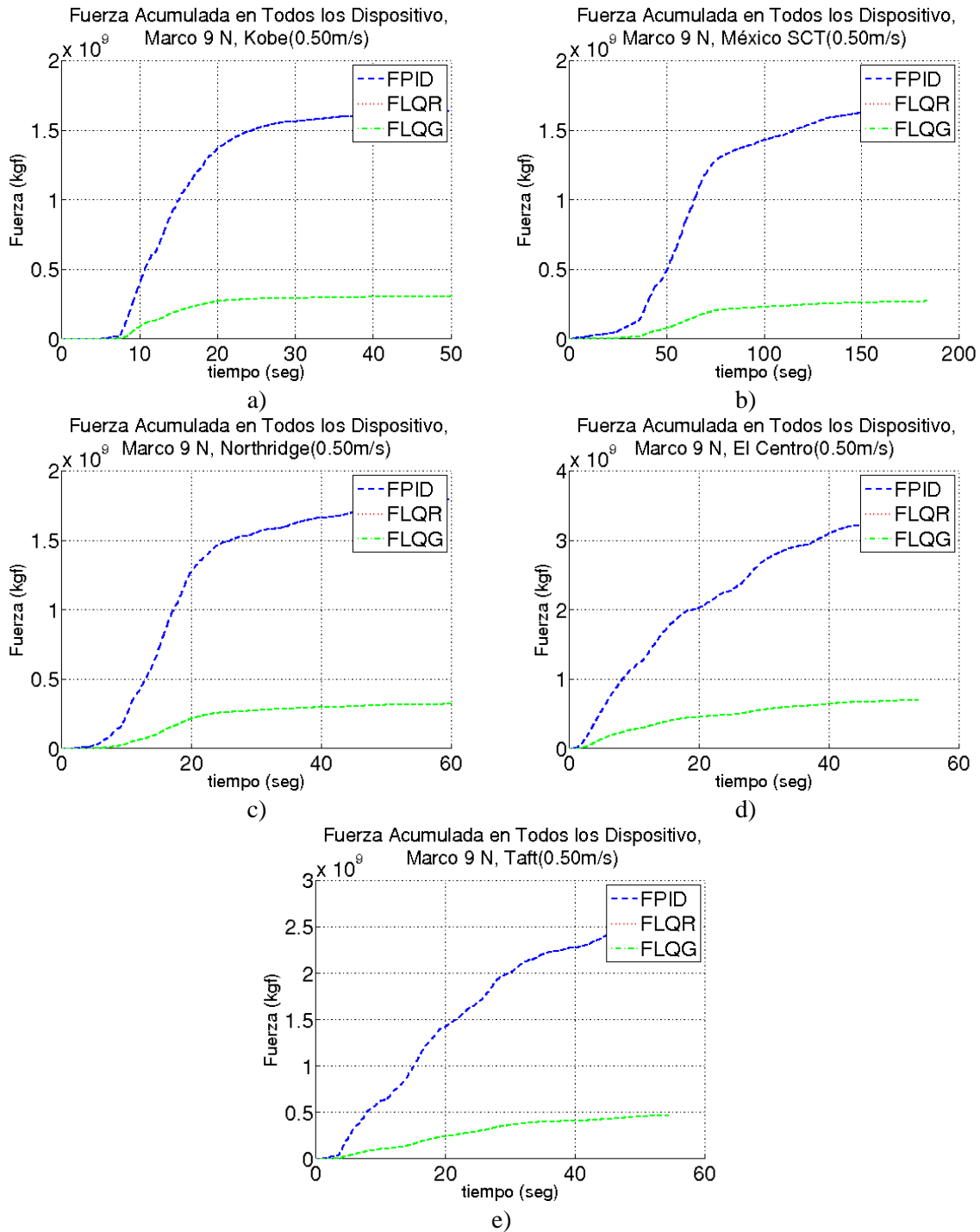


Figura 6.22.- Gráfica fuerza acumulada en los nueve dispositivos del marco de nueve niveles en control activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s

Las fuerzas acumuladas que se exigen en el marco de 20 niveles con dispositivos semi-activos y activos, se muestran en las figuras 6.23 y 6.24 respectivamente. Como era de esperarse, la demanda total de energía de los dos reguladores es mucho menor que con el control PID. En este caso el registro

sísmico que mayor demanda de fuerza tiene es el de México SCT, alrededor de $6 \times 10^9 \text{ kgf}$ en el PID y de 3×10^9 para los controladores LQR y LQG.

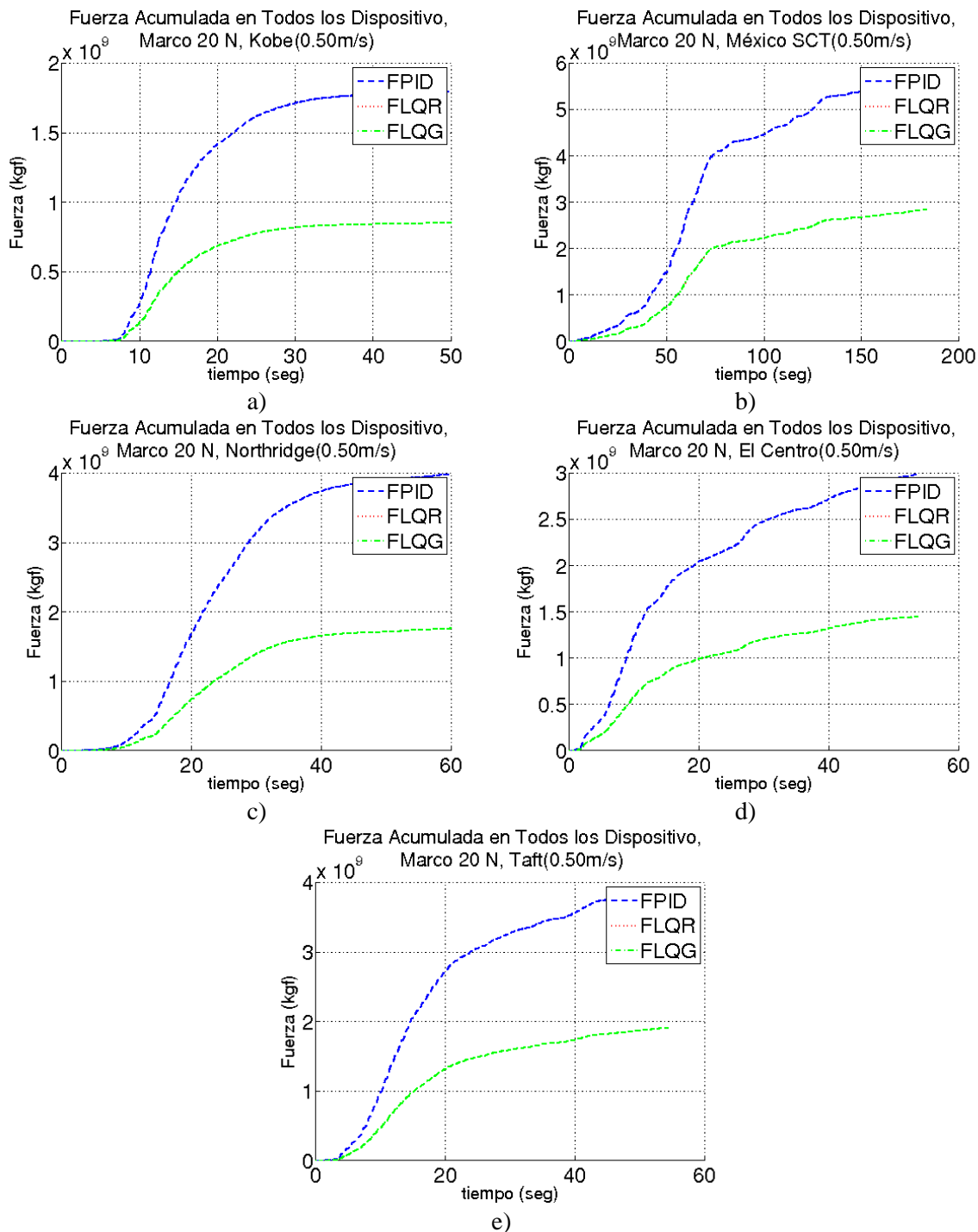


Figura 6.23.- Gráfica fuerza acumulada en los 20 dispositivos del marco de 20 niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s

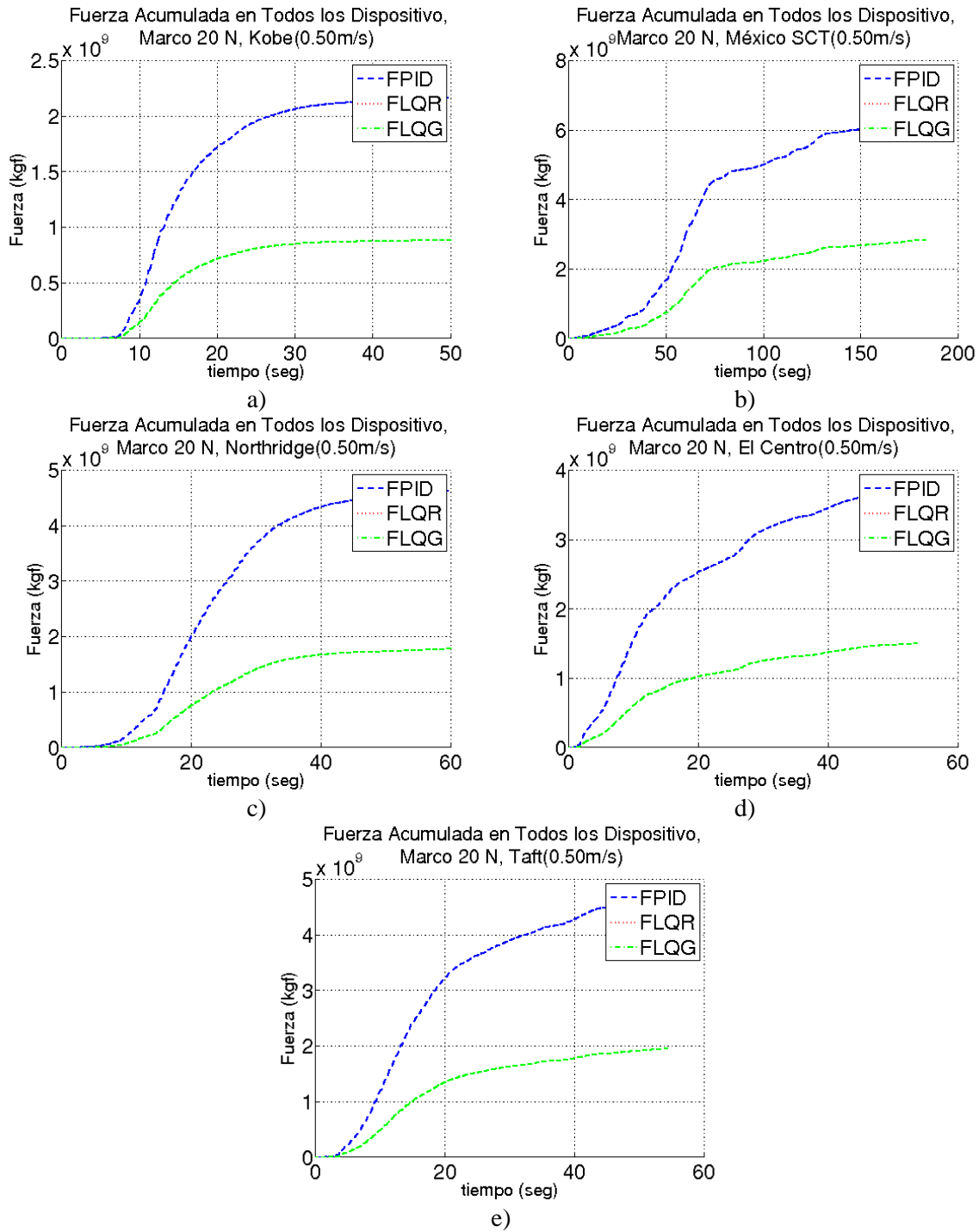


Figura 6.24.- Gráfica fuerza acumulada en los 20 dispositivos del marco de 20 niveles en control activo : a) Kobe 0.5m/s, b) México SCT 0.5m/s, c) Northridge 0.5m/s, d) El Centro 0.5m/s y e) Taft 0.5 m/s

Capítulo 7.- Metodología de Selección y Recomendaciones

7.1 Metodología

Con los resultados obtenidos se demuestra que cada algoritmo de control tiene una mejor aplicabilidad en estructuras dependiendo de su altura o rigidez lateral. De acuerdo con los periodos calculados para cada estructura; la de tres niveles se considera como rígida, la de nueve es medianamente rígida y la de 20 se considera flexible. Además, las diferencias entre los tres algoritmos se mantienen tanto para dispositivos de control activo como con los semi-activos. Es decir que para cada estructura se recomendará un algoritmo de control, no importando si se tienen los recursos de un sistema semi-activo o de uno activo. Lo único que cambiará entre estos dos tipos de dispositivos será la amplitud en la reducción de la respuesta.

Los pasos para definir un algoritmo adecuado en cada estructura son los siguientes:

1.- Primero, para decidir qué tipo de algoritmo utilizar en cada estructura será necesario definir la altura o rigidez y el tipo de control. Además de definir la zona en la que estará el edificio.

2.- Aunque, sería necesario estudiar estructuras con distinto número de niveles a los estudiados en este trabajo. Se propone que el intervalo de estructuras bajas sea menor a 6 pisos, para estructuras medianas de 7 a 12 niveles y las estructuras altas se consideraran con más de 13 pisos.

3.- El primer criterio para seleccionar el algoritmo será la reducción de la respuesta, dejando en segundo plano el consumo de energía. Lo anterior es porque los controladores LQR y LQG mantienen un gran ahorro de energía en todas las estructuras y registros sísmicos.

4.- Teniendo definida la altura de la estructura, se buscará en la tabla correspondiente de índices J1-J6 cual fue el algoritmo que obtuvo valores menores. En el caso de índices que no rige un sólo algoritmo, se evalúa en cuántos casos es un algoritmo mejor que el otro. Si son pocos valores de J_i en los que el algoritmo predominante no fue el mejor, se descartaran esos valores.

5.- También, si en el algoritmo que predomina existen algunos valores mayores a 1 se evaluara cuantos fueron y en qué porcentaje son mayores a la unidad. Si existe una cantidad considerable de valores mayores a 1 en un mismo algoritmo, el algoritmo quedara descartado para su aplicación. Al igual que en el caso donde el porcentaje de amplificación sea muy grande.

6.- Si se tienen dudas de qué algoritmo seleccionar, ya que algunos índices indican un algoritmo y otros un algoritmo distinto. Se dará mayor importancia a los índices J4, J5 y J6 ya que estos valores definen la reducción de la respuesta en toda la duración del registro.

7.- Sin en un mismo registro para una estructura, los tres algoritmos presentan resultados desfavorables. Se sugiere realizar más estudios acerca del comportamiento de dicha estructura con registros sísmicos característicos de la zona en que se desee diseñar.

7.2 Recomendaciones

Para la estructura de tres niveles se recomienda utilizar el controlador PID por su amplia ventaja en la reducción de la respuesta evaluada con los índices J1 a J6. Como se mostró en los resultados, la desventaja de utilizar este algoritmo en estructuras bajas será un mayor consumo de energía, evaluada con los índices J7 y J8 y en las gráficas de fuerza acumulada. Por lo tanto, si no existe mucho interés en la cantidad de energía ocupada por el sistema, el algoritmo PID será adecuado para estructuras de baja altura.

En marcos catalogados de mediana altura como el edificio de 9 niveles tiene mejores resultados el controlador PID cuando se evalúa la máxima distorsión de entrepiso y el cortante basal. La desventaja de este algoritmo en marcos medianos proviene al evaluar las aceleraciones máximas (J2), puesto que hay una ligera amplificación. Para control semi-activo, esta amplificación puede no ser de importancia con excepción del registro sísmico de Kobe, en el cual se amplifica la aceleración hasta en un 16%. Cuando se ocupa control activo la amplificación de aceleraciones ocurre con mayor importancia en los registros de Kobe, Northridge y Taft con hasta 28% más de aceleración.

A pesar de las desventajas mencionadas es recomendable el algoritmo PID para estructuras medianas. Siempre y cuando la importancia sea evitar el daño estructural, puesto que las aceleraciones de los entresijos no generan daño a la estructura. Sin embargo, si en la estructura existen contenidos importantes, debido a que grandes aceleraciones pueden ocasionar daños en éstos. Para evitar esta situación, se puede utilizar un control LQR o un LQG. Ya que con estos dos algoritmos no existen amplificaciones en las aceleraciones y la reducción de distorsiones y cortante basal no son despreciables. Además, los controladores LQG y LQR vuelven a presentar un mejor desempeño cuando se trata de ahorrar la energía aplicada al sistema.

Por último, en los marcos de gran altura como la estructura de 20 niveles comienza a tener mejor desempeño los algoritmos reguladores LQR y LQG. En este caso el algoritmo PID queda descartado porque presenta el mismo comportamiento que en el marco de nueve niveles en cuestión de aceleraciones. Pero las amplificaciones presentadas en el marco de 20 niveles son de hasta 79 % con dispositivos semi-activos y hasta de 170% con actuadores activos.

En el caso de los algoritmos LQR y LQG no existe gran diferencia al evaluar cada índice de desempeño. Al quedar descartado el control PID se recomienda utilizar alguno de los reguladores LQG o LQR para estructuras de gran altura. La única excepción será el registro de México SCT, se debe de estudiar una estructura característica para este terreno. Debido a que en este caso se presentan amplificaciones con los tres algoritmos tanto en distorsiones de entrepiso, aceleraciones y cortante basal máximos. Cabe destacar que a pesar que con el registro de México SCT la demanda de fuerza acumulada es mucho mayor, los controladores no fueron capaces de reducir la respuesta como era requerido y es porque el edificio no es característico de esta ciudad.

En los casos en los que los valores de los índices de desempeño en los reguladores cuadráticos no son mejores que el PID, la diferencia entre ellos no sobrepasa el 8%. Si no se toma en cuenta los resultados del registro de México SCT, un regulador cuadrático será el adecuado para estructuras de gran altura. Lo anterior es debido a que, tanto para control activo como semi-activo, por lo general presentan mayor reducción de la respuesta e incluye un gran ahorro de energía.

En resumen, se recomienda utilizar el algoritmo PID para estructuras bajas y medianas. En estas últimas siempre y cuando no existan contenidos que se puedan dañar a causa de las aceleraciones no reducidas. Para estructuras altas los algoritmos que se recomiendan será cualquiera de los dos reguladores, sin tomar en cuenta los resultados con el registro de México SCT.

Capítulo 8.- Conclusiones e Investigaciones Futuras

8.1 Conclusiones

La parte en la que se debe poner mayor atención para programar cada algoritmo de control, es la selección de los parámetros de cada uno de ellos. La desventaja es que no se tiene mucha información, acerca de cómo ajustar los parámetros de cada algoritmo aplicados a un sistema estructural. Si no se tiene experiencia, para proponer los parámetros es necesario recurrir a buscar información en estudios previos.

En el algoritmo PID resulta más sencillo proponer sus parámetros con las recomendaciones de Yu y Thenozhi, 2014. En el caso de los controladores LQR y LQG pueden ser calibrados a prueba y error con simulaciones previas.

En el caso del control LQG se tuvo problemas con los valores del ruido de entrada y de salida, ya que en los trabajos previos no indican mucho de ellos. Para poder calibrarlos se hicieron varias simulaciones con distintos valores de los ruidos. Con estas simulaciones se pudo llegar a la conclusión de que no importa que tan pequeños sean los ruidos si no la diferencia que hay entre ellos. También se mencionó que el ruido en las salidas(w) debe de ser mayor que en las entradas(v). Esto es porque dentro de las simulaciones hechas se observó mayor reducción de la respuesta con esta condición.

Para modelar las estructuras de manera sencilla, se tuvo que recurrir al uso de una condensación estática. Esta consideración puede que sea una variante en el comportamiento del sistema y más aún para estructuras de gran altura. Además, si se tuvieran los modelos con todos los grados de libertad se puede tener mayor información para evaluar el desempeño de cada sistema.

Para concluir se puede decir que como era de esperarse hay una gran diferencia en el comportamiento de cada algoritmo de control. Además, de su distinto comportamiento dependiendo de la estructura en la cual se va a utilizar (baja, mediana o alta) y de los registros utilizados. También, por los resultados obtenidos con el registro de México SCT y sabiendo que las estructuras utilizadas no son típicas de la Cd. de México; sería recomendable realizar un estudio detallado si se pretende utilizar este tipo de control en estructuras de esta ciudad. Por lo tanto, los sistemas de control activo o semi-activo pueden llegar a ser ampliamente benéficos para una estructura, aunque también llegan a ser perjudiciales si no se selecciona el algoritmo de control adecuado.

Se debe mencionar que los algoritmos LQR y LQG disminuyen la respuesta a la vez que ahorran energía. Lo cual no sucede con el algoritmo PID, que siempre necesita grandes cantidades de energía para poder aplicarlo.

En cuanto a los dispositivos, solo se definió una capacidad de fuerza y amortiguamiento para todos los dispositivos en las tres estructuras. Quizás sea necesario evaluar si las estructuras necesitan actuadores con mayor capacidad. También, si son necesarios dispositivos en todos los niveles o sólo en algunos de ellos.

8.2 Investigaciones Futuras

Después de haber terminado este trabajo, sería importante realizar este estudio utilizando edificios o marcos que cumplan con la normatividad de la Ciudad de México. Así como utilizar registros sísmicos que pueden afectar estas estructuras.

Otra posible investigación futura podría hacerse un trabajo similar, estudiando otros algoritmos empleados en el control estructural. Además, resultaría interesante que todos estos análisis se pudieran realizar tomando en cuenta la no linealidad de las estructuras. También, se podrían hacer análisis de los dispositivos y algoritmos de control con modelos de sistemas estructurales en tres dimensiones.

Otro posible trabajo podría ser la comparación entre distintos tipos de dispositivos de control aplicados en distintas estructuras. Dichos dispositivos podrían ser: El amortiguador de masa activo, dispositivos con fluidos o de fricción variable, sistemas de tendones activos o algún tipo de dispositivo de control híbrido.

También, sería posible investigar algoritmos de control inteligentes como redes neuronales. Los cuales tiene un funcionamiento diferente a los algoritmos estudiados en este trabajo. Los algoritmos inteligentes ya no están basados en el principio de retroalimentación, si no en el aprendizaje de los sistemas dinámicos sujetos a distintas perturbaciones.

Capítulo 9.- Referencias

1. Akbay Z. y Aktan H.M., 1995, “Abating Earthquake Effects on Building by Active Slip Brace Devices”, *Shock and Vibration*, 2:2, 133-142
2. Astrom K. and Hagglund T., 1995, “PID Controllers: Theory, Design, and Tuning”, Segunda Edición, Edit. ISA, 59-71.
3. Constantinou M. C., Soong T. T. y Dargush G. F., 1998, “Pasive Energy Disipation Systems for Structural Design and Retrofit”, *Multidisciplinary Center Earthquake Engineering Research Monograph No.1*, pp- 322.
4. Constantinou M. C., y Symans M. D., 1993, “Experimental Study of Seismic Response of Buildings With Supplemental Fluid Dampers”, *The Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 2, 93-132.
5. Cheng F. Y., Jiang H., Lou K., 2008, “Smart Structures, Innovative Systems for Seismic Response Control”, 1era Edición, Edit. CRC Press, Taylor & Francis Group, 1-50.
6. Chopra A. K., 2014, “Dinámica de estructuras”, 4ta Edición, Edit. Pearson, 452-463
7. Datta T. K., 2003, “A State of the Art Review on Active Control of Structures”, *ISSET Journal of Earthquake Technology*, Vol. 40, No. 1, 1-17.
8. N.R. Fisco y H. Adeli, 2011, “Smart Structures: Part I- Active and Semi-active Control”, *Scientia Iranica*, 18(3), 275-284.
9. Gawronski W. K., 2004(a), “Advanced Structural Dynamics and Active Control of Structures”, Edit, Springer, 13-40.
10. Gawronski W. K., 2004(b), “Advanced Structural Dynamics and Active Control of Structures”, Edit, Springer, 249-286.
11. Honeywell D., 2000, “Chapter 10, PID Control, consultado en mayo del 2016, http://www.cds.caltech.edu/~murray/books/AM08/pdf/am06-pid_16Sep06.pdf
12. Hartog J.P.D., 1947, “Mechanical Vibrations” 3er Edición, Edit. McGraw-Hill, 103-119.
13. Housner G. W., Bergman L. A., Caughey T. K., Chassiakos A. G., Claus R. O., Masri S. F., Skelton R. E., Soong T. T., Spencer B. F. y Yao J. T. P., 1997, “Structural Control: Past, Present, And Future”, *Journal Of Engineering Mechanics*, 123, 9, 897-971.
14. IINGEN UNAM, 2014, “Base de Datos de Registros Acelerográficos de la Red Sísmica Mexicana”, consultado en abril del 2017, <http://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/Inicio.aspx>
15. Jansen L.M. y Dyke S.J., (2000). “Semiactive control strategies for MR dampers: comparative study”, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 126(8), 795-803.

16. Kurata N., Kobori T., Takahashi M., Niwa N. and Midorikawa H., (1999). "Actual Seismic Response Controlled Building With Semi-Active Damper System", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 28, 1427-1447.
17. MathWorks,1," Linear-Quadratic-Gaussian (LQG)Design", consultado en noviembre del 2016, https://www.mathworks.com/help/control/getstart/linear-quadratic-gaussian-lqg-design.html#brs1m_1
18. Naeim F. y Kelly J. M., 1999, "Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice," Edit. John Wiley & Sons, Inc.
19. Nagarajaiah S. y Xiaohong S., 2000, "Response of Base-Isolated USC Hospital Building in Northridge Earthquake", Journal of Structural Engineering, Vol. 126, No. 10, 1177-1186.
20. Ohtori Y., Christenson R. E. y Spencer B. F., 2004, "Benchmark Control Problems for Seismically Excited Nonlinear Buildings", Journal of Engineering Mechanics, 130(4), 366-385.
21. Rai D. C., 2000, "Future in Earthquake-Resistant Design of Structures", Current Science, Vol. 79, No. 9, 1291-1300.
22. Rentzos P., 2007, "Active Vibration Control of Civil Engineering Structures", City University London, 37-66.
23. SAC Project, 1994, "Project Overview", consultado en mayo del 2017, <http://www.sacsteel.org/index-2.html>
24. Soong T.T., Masri S.F. y Housner G.W., 1991, "An Overview of Active Structural Control under Seismic Loads", Earthquake Spectra Vol. 7 No.3, 483-501.
25. Sosa A. y Ruiz S. E., 1992, "Análisis Estructural y Costos de Edificios con Aisladores Sísmicos", Revista de Ingeniería Sísmica, No. 44, 11-28.
26. Sotero H., 1997, "Acelerogramas de Terremotos", consultado en abril del 2017, <http://www.hernansgz.com/Dinamica1.htm>
27. Symans M.D. y Constantinou M.C.,1999, "Semi-Active Control Systems for Seismic Protection of Structures: a State of the Art Review", Engineering Structures, 21, 469-487.
28. Ugarte L. B., Ruiz Sandoval M. E. y Spencer B. F., 2012, "Estudio de Sistemas de Control Semi-Activo en Edificios Acoplados", Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo, Vol 4,No 1, 18-39.
29. Thenozhi S. y Yu W., 2014, "Stability analysis of active vibration control of building structures using PD/PID control", Engineering Structures, 81, 208-218.
30. Yu W. y Thenozhi S., 2016, "Active Structural Control with Stable Fuzzy PID Techniques" 1er Edición, Edit. Springer, 1-40.

Apéndice A.- Resultados de todos los índices de desempeño

Tabla A.1.- Índices (J1, J2 y J3) de desempeño del marco de tres niveles Semi-Activo

Escala del Registro	Registro	N	J1			J2			J3		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	1	0.7227	0.8961	0.8985	0.9735	0.9232	0.9241	0.7293	0.8964	0.8999
		2	0.7204	0.9045	0.9066	0.7532	0.8825	0.8873			
		3	0.7301	0.9157	0.9175	0.8007	0.9206	0.9235			
	Mexico SCT	1	0.8928	0.9713	0.9727	0.9718	0.9819	0.9823	0.9033	0.9730	0.9744
		2	0.8696	0.9670	0.9686	0.8949	0.9699	0.9715			
		3	0.8446	0.9641	0.9657	0.8731	0.9652	0.9665			
	Northridge	1	0.7550	0.8983	0.8939	0.8508	0.9090	0.8922	0.7878	0.9348	0.9285
		2	0.9336	0.9681	0.9698	0.6115	0.8184	0.8123			
		3	0.7770	0.8523	0.8447	0.7542	0.8559	0.8501			
	El Centro	1	0.8546	0.9278	0.9290	0.9665	0.9263	0.9239	0.8630	0.9268	0.9278
		2	0.8648	0.9355	0.9379	0.9037	0.9367	0.9397			
		3	0.9127	0.9384	0.9404	0.9716	0.9475	0.9499			
	Taft	1	0.6403	0.8524	0.8540	0.6237	0.8392	0.8362	0.6391	0.8526	0.8539
		2	0.6582	0.8661	0.8680	0.6721	0.8536	0.8553			
		3	0.6263	0.8537	0.8548	0.6704	0.8509	0.8518			
0.25 m/s	Kobe	1	0.7020	0.8961	0.8985	0.8923	0.9232	0.9241	0.7213	0.8964	0.8999
		2	0.6841	0.9045	0.9066	0.7278	0.8825	0.8873			
		3	0.6873	0.9157	0.9175	0.7207	0.9206	0.9235			
	Mexico SCT	1	0.8933	0.9713	0.9727	0.9719	0.9819	0.9823	0.9038	0.9730	0.9744
		2	0.8703	0.9670	0.9686	0.8955	0.9699	0.9715			
		3	0.8455	0.9641	0.9657	0.8738	0.9652	0.9665			
	Northridge	1	0.7509	0.8983	0.8939	0.8125	0.9090	0.8922	0.7813	0.9348	0.9285
		2	0.9224	0.9681	0.9698	0.6243	0.8184	0.8123			
		3	0.7506	0.8523	0.8447	0.7326	0.8559	0.8501			
	El Centro	1	0.7931	0.9278	0.9290	0.8850	0.9263	0.9239	0.7983	0.9268	0.9278
		2	0.8031	0.9355	0.9379	0.8567	0.9367	0.9397			
		3	0.8420	0.9384	0.9404	0.9472	0.9475	0.9499			
	Taft	1	0.6299	0.8524	0.8540	0.5848	0.8392	0.8362	0.6292	0.8526	0.8539
		2	0.6520	0.8661	0.8680	0.6195	0.8536	0.8553			
		3	0.6057	0.8537	0.8548	0.6277	0.8509	0.8518			

Tabla A.2.- Índices (J4, J5 y J6) de desempeño del marco de tres niveles Semi-Activo

Escala del Registro	Registro	N	J4			J5			J6		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	1	0.8254	0.9419	0.9439	0.9001	0.9507	0.9515	0.8365	0.9444	0.9466
		2	0.8122	0.9403	0.9423	0.8396	0.9420	0.9441			
		3	0.8024	0.9383	0.9404	0.8209	0.9402	0.9425			
	Mexico SCT	1	0.9277	0.9708	0.9718	0.9780	0.9897	0.9899	0.9354	0.9722	0.9728
		2	0.9031	0.9634	0.9647	0.9325	0.9702	0.9708			
		3	0.8735	0.9568	0.9583	0.8962	0.9567	0.9576			
	Northridge	1	0.6583	0.8557	0.8561	0.5778	0.8081	0.8023	0.6656	0.8562	0.8563
		2	0.6633	0.8634	0.8647	0.5774	0.8134	0.8104			
		3	0.5992	0.8339	0.8321	0.5995	0.8301	0.8286			

0.25 m/s	El Centro	1	0.6693	0.8428	0.8446	0.7185	0.8404	0.8401	0.6784	0.8451	0.8471
		2	0.6612	0.8417	0.8436	0.6793	0.8404	0.8420			
		3	0.6562	0.8390	0.8407	0.6680	0.8403	0.8422			
	Taft	1	0.6704	0.8610	0.8627	0.6688	0.8486	0.8471	0.6796	0.8631	0.8649
		2	0.6632	0.8617	0.8634	0.6672	0.8550	0.8562			
		3	0.6458	0.8577	0.8591	0.6599	0.8587	0.8604			
	Kobe	1	0.8121	0.9419	0.9439	0.8764	0.9507	0.9515	0.8234	0.9444	0.9466
		2	0.7960	0.9403	0.9423	0.8256	0.9420	0.9441			
		3	0.7761	0.9383	0.9404	0.8005	0.9402	0.9425			
	Mexico SCT	1	0.9279	0.9708	0.9718	0.9780	0.9897	0.9899	0.9356	0.9722	0.9728
		2	0.9035	0.9634	0.9647	0.9327	0.9702	0.9708			
		3	0.8740	0.9568	0.9583	0.8966	0.9567	0.9576			
	Northridge	1	0.6659	0.8557	0.8561	0.5759	0.8081	0.8023	0.6727	0.8562	0.8563
		2	0.6698	0.8634	0.8647	0.5879	0.8134	0.8104			
		3	0.6026	0.8339	0.8321	0.6012	0.8301	0.8286			
	El Centro	1	0.6273	0.8428	0.8446	0.6777	0.8404	0.8401	0.6365	0.8451	0.8471
		2	0.6153	0.8417	0.8436	0.6356	0.8404	0.8420			
		3	0.6025	0.8390	0.8407	0.6189	0.8403	0.8422			
	Taft	1	0.6637	0.8610	0.8627	0.6621	0.8486	0.8471	0.6729	0.8631	0.8649
		2	0.6553	0.8617	0.8634	0.6619	0.8550	0.8562			
		3	0.6350	0.8577	0.8591	0.6509	0.8587	0.8604			

Tabla A.3.- Índices (J7 y J8) de desempeño del marco de tres niveles Semi-Activo

Escala del Registro	Registro	N	J7			J8		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	1	0.7148	0.4492	0.4419	0.1316	0.0715	0.0715
		2	1.0000	0.4975	0.4884	0.2453	0.0765	0.0766
		3	1.0000	0.3621	0.3587	0.2804	0.0525	0.0527
	Mexico SCT	1	0.1362	0.0831	0.0808	0.0152	0.0086	0.0083
		2	0.2777	0.0888	0.0866	0.0303	0.0090	0.0088
		3	0.3679	0.0606	0.0593	0.0400	0.0061	0.0059
	Northridge	1	0.7832	0.3526	0.3427	0.0931	0.0452	0.0440
		2	1.0000	0.3529	0.3576	0.1523	0.0476	0.0482
		3	1.0000	0.3432	0.3983	0.1995	0.0410	0.0424
	El Centro	1	1.0000	0.7760	0.7958	0.2230	0.1314	0.1312
		2	1.0000	0.8689	0.8895	0.3577	0.1400	0.1401
		3	1.0000	0.6558	0.6760	0.4106	0.0969	0.0973
	Taft	1	0.7105	0.4259	0.4294	0.1343	0.0801	0.0801
		2	1.0000	0.4734	0.4696	0.2620	0.0857	0.0861
		3	1.0000	0.3370	0.3292	0.3233	0.0604	0.0611
0.25 m/s	Kobe	1	0.3679	0.2246	0.2209	0.0629	0.0358	0.0358
		2	0.7638	0.2487	0.2442	0.1294	0.0383	0.0383
		3	1.0000	0.1811	0.1793	0.1737	0.0263	0.0263
	Mexico SCT	1	0.0678	0.0416	0.0404	0.0075	0.0043	0.0042
		2	0.1382	0.0444	0.0433	0.0151	0.0045	0.0044
		3	0.1831	0.0303	0.0296	0.0199	0.0030	0.0030
	Northridge	1	0.3745	0.1763	0.1714	0.0450	0.0226	0.0220
		2	0.7553	0.1765	0.1788	0.0768	0.0238	0.0241
		3	0.9942	0.1716	0.1991	0.1037	0.0205	0.0212
	El Centro	1	0.7020	0.3880	0.3979	0.1032	0.0657	0.0656
		2	1.0000	0.4344	0.4448	0.2023	0.0700	0.0701

		3	1.0000	0.3279	0.3380	0.2582	0.0485	0.0487
	Taft	1	0.3631	0.2129	0.2147	0.0649	0.0401	0.0401
		2	0.6900	0.2367	0.2348	0.1313	0.0428	0.0430
		3	0.9030	0.1685	0.1646	0.1756	0.0302	0.0305

Tabla A.4.- Índices (J1, J2 y J3) de desempeño del marco de tres niveles Activo

Escala del Registro	Registro	N	J1			J2			J3		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	1	0.7251	0.8963	0.8986	0.9456	0.9268	0.9274	0.7318	0.8967	0.9001
		2	0.7183	0.9044	0.9065	0.7476	0.8826	0.8858			
		3	0.7254	0.9152	0.9171	0.7983	0.9203	0.9232			
	Mexico SCT	1	0.8924	0.9713	0.9727	0.9734	0.9818	0.9818	0.9031	0.9730	0.9744
		2	0.8683	0.9670	0.9685	0.8948	0.9696	0.9711			
		3	0.8426	0.9642	0.9659	0.8706	0.9653	0.9668			
	Northridge	1	0.7651	0.9006	0.8986	0.8552	0.9112	0.9071	0.8051	0.9375	0.9341
		2	0.9510	0.9702	0.9731	0.5703	0.8209	0.8207			
		3	0.7992	0.8571	0.8543	0.7474	0.8611	0.8604			
	El Centro	1	0.8582	0.9280	0.9293	1.0021	0.9285	0.9278	0.8681	0.9255	0.9256
		2	0.8658	0.9356	0.9379	0.9200	0.9393	0.9414			
		3	0.9226	0.9384	0.9405	0.9801	0.9474	0.9501			
	Taft	1	0.6408	0.8535	0.8550	0.6534	0.8469	0.8441	0.6401	0.8539	0.8552
		2	0.6554	0.8643	0.8664	0.6352	0.8592	0.8609			
		3	0.6293	0.8575	0.8587	0.6752	0.8528	0.8539			
0.25 m/s	Kobe	1	0.7049	0.8963	0.8986	0.9320	0.9268	0.9274	0.7252	0.8967	0.9001
		2	0.6836	0.9044	0.9065	0.7231	0.8826	0.8858			
		3	0.6861	0.9152	0.9171	0.7198	0.9203	0.9232			
	Mexico SCT	1	0.8928	0.9713	0.9727	0.9735	0.9818	0.9818	0.9035	0.9730	0.9744
		2	0.8689	0.9670	0.9685	0.8992	0.9696	0.9711			
		3	0.8437	0.9642	0.9659	0.8719	0.9653	0.9668			
	Northridge	1	0.7589	0.9006	0.8986	0.8347	0.9112	0.9071	0.7958	0.9375	0.9341
		2	0.9404	0.9702	0.9731	0.5828	0.8209	0.8207			
		3	0.7782	0.8571	0.8543	0.8094	0.8611	0.8604			
	El Centro	1	0.7991	0.9280	0.9293	0.9501	0.9285	0.9278	0.8056	0.9255	0.9256
		2	0.8049	0.9356	0.9379	0.9000	0.9393	0.9414			
		3	0.8417	0.9384	0.9405	0.9471	0.9474	0.9501			
	Taft	1	0.6307	0.8535	0.8550	0.6116	0.8469	0.8441	0.6313	0.8539	0.8552
		2	0.6475	0.8643	0.8664	0.6258	0.8592	0.8609			
		3	0.6047	0.8575	0.8587	0.6259	0.8528	0.8539			

Tabla A.5.- Índices (J4, J5 y J6) de desempeño del marco de tres niveles Activo

Escala del Registro	Registro	N	J4			J5			J6		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	1	0.8256	0.9419	0.9440	0.9091	0.9513	0.9521	0.8370	0.9444	0.9466
		2	0.8117	0.9403	0.9424	0.8414	0.9421	0.9443			
		3	0.8009	0.9384	0.9405	0.8223	0.9402	0.9426			
	Mexico SCT	1	0.9270	0.9708	0.9718	0.9778	0.9897	0.9899	0.9352	0.9722	0.9728
		2	0.9021	0.9635	0.9647	0.9323	0.9702	0.9708			
		3	0.8720	0.9568	0.9583	0.8959	0.9567	0.9576			
	Northridge	1	0.6582	0.8551	0.8562	0.5944	0.8178	0.8141	0.6664	0.8561	0.8569

0.25 m/s			2	0.6615	0.8617	0.8636	0.5855	0.8199	0.8182	
			3	0.6044	0.8365	0.8361	0.6052	0.8336	0.8337	
		El Centro	1	0.6711	0.8427	0.8446	0.7343	0.8432	0.8431	0.6806 0.8450 0.8470
			2	0.6620	0.8416	0.8435	0.6850	0.8409	0.8426	
			3	0.6575	0.8390	0.8408	0.6715	0.8405	0.8424	
		Taft	1	0.6688	0.8607	0.8626	0.6882	0.8556	0.8542	0.6784 0.8629 0.8649
			2	0.6606	0.8612	0.8632	0.6707	0.8566	0.8580	
			3	0.6456	0.8583	0.8599	0.6620	0.8595	0.8614	
		Kobe	1	0.8115	0.9419	0.9440	0.8770	0.9513	0.9521	0.8229 0.9444 0.9466
			2	0.7954	0.9403	0.9424	0.8252	0.9421	0.9443	
			3	0.7763	0.9384	0.9405	0.8003	0.9402	0.9426	
		Mexico SCT	1	0.9273	0.9708	0.9718	0.9779	0.9897	0.9899	0.9354 0.9722 0.9728
			2	0.9025	0.9635	0.9647	0.9325	0.9702	0.9708	
			3	0.8726	0.9568	0.9583	0.8963	0.9567	0.9576	
		Northridge	1	0.6642	0.8551	0.8562	0.5979	0.8178	0.8141	0.6722 0.8561 0.8569
			2	0.6657	0.8617	0.8636	0.5999	0.8199	0.8182	
			3	0.6082	0.8365	0.8361	0.6083	0.8336	0.8337	
		El Centro	1	0.6272	0.8427	0.8446	0.6966	0.8432	0.8431	0.6367 0.8450 0.8470
			2	0.6144	0.8416	0.8435	0.6388	0.8409	0.8426	
			3	0.6031	0.8390	0.8408	0.6208	0.8405	0.8424	
		Taft	1	0.6618	0.8607	0.8626	0.6795	0.8556	0.8542	0.6712 0.8629 0.8649
			2	0.6527	0.8612	0.8632	0.6650	0.8566	0.8580	
			3	0.6356	0.8583	0.8599	0.6524	0.8595	0.8614	

Tabla A.6.- Índices (J7 y J8) de desempeño del marco de tres niveles Activo

Escala del Registro	Registro	N	J7			J8		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	1	0.7007	0.4490	0.4417	0.1320	0.0715	0.0715
		2	1.0000	0.4976	0.4885	0.2457	0.0765	0.0766
		3	1.0000	0.3622	0.3587	0.2818	0.0525	0.0527
	Mexico SCT	1	0.1360	0.0831	0.0808	0.0152	0.0086	0.0083
		2	0.2774	0.0888	0.0866	0.0303	0.0090	0.0088
		3	0.3674	0.0606	0.0593	0.0400	0.0061	0.0059
	Northridge	1	0.8163	0.3540	0.3449	0.0945	0.0454	0.0447
		2	1.0000	0.3525	0.3575	0.1550	0.0476	0.0482
		3	1.0000	0.3448	0.4008	0.2031	0.0415	0.0429
	El Centro	1	1.0000	0.7761	0.7959	0.2240	0.1314	0.1312
		2	1.0000	0.8688	0.8894	0.3588	0.1400	0.1401
		3	1.0000	0.6559	0.6761	0.4153	0.0970	0.0974
	Taft	1	0.7117	0.4257	0.4295	0.1349	0.0801	0.0802
		2	1.0000	0.4724	0.4685	0.2618	0.0856	0.0861
		3	1.0000	0.3387	0.3309	0.3263	0.0608	0.0614
0.25 m/s	Kobe	1	0.3678	0.2245	0.2209	0.0629	0.0358	0.0358
		2	0.7634	0.2488	0.2443	0.1293	0.0383	0.0383
		3	1.0000	0.1811	0.1794	0.1738	0.0263	0.0264
	Mexico SCT	1	0.0677	0.0416	0.0404	0.0075	0.0043	0.0042
		2	0.1380	0.0444	0.0433	0.0151	0.0045	0.0044
		3	0.1829	0.0303	0.0296	0.0199	0.0030	0.0030
	Northridge	1	0.3852	0.1770	0.1725	0.0458	0.0227	0.0223
		2	0.7500	0.1763	0.1788	0.0777	0.0238	0.0241
		3	1.0000	0.1724	0.2004	0.1053	0.0208	0.0215
	El Centro	1	0.7030	0.3880	0.3980	0.1039	0.0657	0.0656

		2	1.0000	0.4344	0.4447	0.2029	0.0700	0.0701
		3	1.0000	0.3279	0.3380	0.2595	0.0485	0.0487
	Taft	1	0.3639	0.2128	0.2147	0.0651	0.0401	0.0401
		2	0.6888	0.2362	0.2342	0.1310	0.0428	0.0430
		3	0.9030	0.1694	0.1654	0.1766	0.0304	0.0307

Tabla A.7.- Índices (J1, J2 y J3) de desempeño del marco de nueve niveles Semi-Activo

Escala del Registro	Registro	N	J1			J2			J3		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	1	0.9488	0.9657	0.9676	1.0887	0.9483	0.9440	0.9578	0.9676	0.9688
		2	0.9395	0.9622	0.9637	1.1237	0.9412	0.9401			
		3	0.9426	0.9688	0.9728	1.1050	0.9611	0.9628			
		4	0.9586	0.9772	0.9820	1.0934	0.9485	0.9501			
		5	0.9597	0.9763	0.9801	1.0192	0.9599	0.9548			
		6	0.9512	0.9712	0.9751	0.9877	0.9652	0.9650			
		7	0.9528	0.9659	0.9705	0.9740	0.9836	0.9911			
		8	0.9558	0.9608	0.9631	0.9995	0.9605	0.9660			
		9	0.9357	0.9613	0.9634	0.9979	0.9603	0.9657			
	Mexico SCT	1	0.8761	0.9538	0.9559	0.9416	0.9689	0.9702	0.8827	0.9548	0.9559
		2	0.8693	0.9529	0.9544	0.9230	0.9644	0.9648			
		3	0.8624	0.9517	0.9532	0.9080	0.9587	0.9601			
		4	0.8545	0.9506	0.9519	0.9274	0.9552	0.9564			
		5	0.8492	0.9500	0.9513	0.9339	0.9531	0.9546			
		6	0.8396	0.9491	0.9506	0.9435	0.9515	0.9517			
		7	0.8338	0.9488	0.9505	0.9393	0.9501	0.9502			
		8	0.8161	0.9484	0.9509	0.9021	0.9487	0.9499			
		9	0.8067	0.9485	0.9513	0.8500	0.9482	0.9510			
	Northridge	1	0.8352	0.9327	0.9349	0.7057	0.9405	0.9474	0.8415	0.9327	0.9344
		2	0.8365	0.9318	0.9340	0.6668	0.8786	0.8855			
		3	0.8295	0.9304	0.9328	0.7161	0.8698	0.8611			
		4	0.8217	0.9294	0.9320	0.8802	0.9312	0.9363			
		5	0.8089	0.9272	0.9298	0.8644	0.9792	0.9862			
		6	0.7920	0.9203	0.9229	0.8011	0.9103	0.9222			
		7	0.8071	0.9146	0.9177	0.6990	0.9225	0.9304			
		8	0.6691	0.9036	0.9095	0.7336	0.8980	0.9022			
		9	0.6389	0.9128	0.9185	0.7091	0.9158	0.9220			
	El Centro	1	0.9043	0.9444	0.9466	0.8433	0.9004	0.8953	0.9107	0.9451	0.9473
		2	0.8945	0.9438	0.9455	0.9172	0.9311	0.9369			
		3	0.8884	0.9417	0.9432	0.8969	0.9428	0.9447			
		4	0.9151	0.9335	0.9365	0.8482	0.9016	0.8986			
		5	0.9054	0.9331	0.9359	0.8303	0.8873	0.8890			
		6	0.9025	0.9304	0.9312	0.9127	0.9382	0.9387			
		7	0.9051	0.9314	0.9318	0.9156	0.9572	0.9549			
		8	0.8861	0.9287	0.9278	1.0096	0.9304	0.9295			
		9	0.8585	0.9305	0.9298	0.9056	0.9327	0.9315			
	Taft	1	0.9013	0.9435	0.9451	0.7397	0.8384	0.8474	0.8995	0.9319	0.9334
		2	0.9186	0.9719	0.9735	0.7188	0.8350	0.8345			
		3	0.9123	0.9386	0.9427	0.8056	0.8984	0.9047			
		4	0.8494	0.9411	0.9471	0.8093	0.9114	0.9168			
		5	0.8243	0.9407	0.9482	0.8919	0.9190	0.9259			
		6	0.8349	0.9409	0.9474	0.9290	0.9288	0.9327			
		7	0.8288	0.9371	0.9419	1.0003	0.9412	0.9528			

0.25 m/s		8	0.7879	0.9261	0.9268	1.0063	0.9352	0.9412			
		9	0.7595	0.9164	0.9150	0.8525	0.8968	0.9004			
	Kobe	1	0.9189	0.9614	0.9634	1.0013	0.9483	0.9440	0.9282	0.9631	0.9643
		2	0.9043	0.9586	0.9602	1.0421	0.9412	0.9401			
		3	0.9297	0.9667	0.9707	1.1204	0.9576	0.9594			
		4	0.9338	0.9736	0.9789	1.1685	0.9499	0.9510			
		5	0.9278	0.9725	0.9778	1.1446	0.9660	0.9677			
		6	0.9175	0.9696	0.9750	1.0550	0.9596	0.9614			
		7	0.9046	0.9671	0.9719	0.9990	0.9773	0.9855			
		8	0.8948	0.9643	0.9670	0.9791	0.9623	0.9685			
		9	0.8758	0.9656	0.9683	0.9361	0.9670	0.9711			
	Mexico SCT	1	0.8767	0.9538	0.9559	0.9406	0.9689	0.9702	0.8832	0.9548	0.9559
		2	0.8700	0.9529	0.9544	0.9254	0.9644	0.9648			
		3	0.8631	0.9517	0.9532	0.9120	0.9587	0.9601			
		4	0.8552	0.9506	0.9519	0.8941	0.9552	0.9564			
		5	0.8496	0.9500	0.9513	0.9110	0.9531	0.9546			
		6	0.8402	0.9491	0.9506	0.9361	0.9515	0.9517			
		7	0.8337	0.9488	0.9505	0.9352	0.9501	0.9502			
		8	0.8171	0.9484	0.9509	0.9008	0.9487	0.9499			
		9	0.8069	0.9485	0.9513	0.8504	0.9482	0.9510			
	Northridge	1	0.8256	0.9327	0.9349	0.6411	0.9405	0.9474	0.8320	0.9327	0.9344
		2	0.8256	0.9318	0.9340	0.6453	0.8786	0.8855			
		3	0.8210	0.9304	0.9328	0.7194	0.8698	0.8611			
		4	0.8116	0.9294	0.9320	0.8988	0.9312	0.9363			
		5	0.8005	0.9272	0.9298	0.9275	0.9792	0.9862			
		6	0.7815	0.9203	0.9229	0.7112	0.9103	0.9222			
		7	0.7786	0.9146	0.9177	0.5907	0.9225	0.9304			
		8	0.6125	0.9036	0.9095	0.7044	0.8980	0.9022			
		9	0.5688	0.9128	0.9185	0.6583	0.9158	0.9220			
	El Centro	1	0.8501	0.9385	0.9410	0.7962	0.8948	0.8990	0.8551	0.9389	0.9416
		2	0.8402	0.9379	0.9399	0.8345	0.9204	0.9276			
		3	0.8397	0.9359	0.9378	0.8054	0.9329	0.9391			
		4	0.8562	0.9251	0.9267	0.7725	0.8999	0.9000			
		5	0.8469	0.9233	0.9251	0.8198	0.8958	0.9011			
		6	0.8445	0.9195	0.9219	0.8454	0.9302	0.9329			
		7	0.8371	0.9225	0.9266	0.8793	0.9395	0.9425			
		8	0.8282	0.9198	0.9254	1.0427	0.9243	0.9300			
		9	0.7888	0.9201	0.9259	0.9006	0.9229	0.9290			
	Taft	1	0.8798	0.9435	0.9451	0.6822	0.8384	0.8474	0.8765	0.9319	0.9334
		2	0.9018	0.9719	0.9735	0.6542	0.8350	0.8345			
		3	0.9100	0.9386	0.9427	0.7441	0.8984	0.9047			
		4	0.8375	0.9411	0.9471	0.7752	0.9114	0.9168			
		5	0.7928	0.9407	0.9482	0.8577	0.9190	0.9259			
		6	0.7802	0.9409	0.9474	0.9747	0.9288	0.9327			
		7	0.7721	0.9371	0.9419	1.0036	0.9412	0.9528			
		8	0.7605	0.9261	0.9268	0.8683	0.9352	0.9412			
		9	0.7580	0.9164	0.9150	0.7711	0.8968	0.9004			

Tabla A.8.- Índices (J4, J5 y J6) de desempeño del marco de nueve niveles Semi-Activo

Escala del Registro	Registro	N	J4			J5			J6		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	1	0.8311	0.9074	0.9094	0.7438	0.8746	0.8792	0.8375	0.9090	0.9116

0.25 m/s		2	0.8329	0.9094	0.9117	0.7383	0.8750	0.8792	
		3	0.8337	0.9104	0.9128	0.7566	0.8808	0.8848	
		4	0.8319	0.9108	0.9133	0.7811	0.8885	0.8922	
		5	0.8264	0.9096	0.9121	0.8048	0.8965	0.8998	
		6	0.8118	0.9054	0.9082	0.8374	0.9078	0.9106	
		7	0.7933	0.9004	0.9034	0.8484	0.9128	0.9154	
		8	0.7682	0.8928	0.8960	0.7925	0.8957	0.8993	
		9	0.7590	0.8919	0.8953	0.7615	0.8881	0.8921	
	Mexico SCT	1	0.9067	0.9601	0.9622	0.9610	0.9804	0.9810	0.9130 0.9610 0.9620
		2	0.9004	0.9585	0.9600	0.9448	0.9741	0.9749	
		3	0.8941	0.9568	0.9583	0.9308	0.9678	0.9687	
		4	0.8867	0.9550	0.9563	0.9222	0.9642	0.9652	
		5	0.8803	0.9536	0.9550	0.9157	0.9615	0.9625	
		6	0.8703	0.9515	0.9531	0.9068	0.9578	0.9589	
		7	0.8602	0.9501	0.9517	0.8986	0.9549	0.9560	
		8	0.8444	0.9482	0.9504	0.8827	0.9490	0.9503	
		9	0.8294	0.9482	0.9503	0.8739	0.9473	0.9487	
	Northridge	1	0.6707	0.8478	0.8503	0.6751	0.8706	0.8749	0.6776 0.8495 0.8521
		2	0.6691	0.8485	0.8510	0.6572	0.8605	0.8649	
		3	0.6667	0.8486	0.8511	0.6693	0.8549	0.8584	
		4	0.6627	0.8489	0.8515	0.6809	0.8553	0.8584	
		5	0.6585	0.8485	0.8512	0.6841	0.8574	0.8607	
		6	0.6518	0.8479	0.8506	0.6687	0.8577	0.8616	
		7	0.6465	0.8477	0.8504	0.6594	0.8556	0.8597	
		8	0.6376	0.8485	0.8514	0.6595	0.8484	0.8513	
		9	0.6316	0.8495	0.8525	0.6453	0.8517	0.8549	
	El Centro	1	0.7332	0.8552	0.8571	0.7460	0.8641	0.8668	0.7390 0.8567 0.8588
		2	0.7329	0.8562	0.8582	0.7359	0.8582	0.8607	
		3	0.7329	0.8568	0.8588	0.7373	0.8559	0.8582	
		4	0.7326	0.8575	0.8597	0.7390	0.8564	0.8585	
		5	0.7320	0.8580	0.8601	0.7393	0.8571	0.8593	
		6	0.7309	0.8585	0.8606	0.7392	0.8578	0.8604	
		7	0.7289	0.8587	0.8609	0.7393	0.8593	0.8617	
		8	0.7253	0.8587	0.8607	0.7411	0.8595	0.8618	
		9	0.7209	0.8589	0.8611	0.7339	0.8601	0.8626	
	Taft	1	0.7214	0.8760	0.8779	0.6984	0.8735	0.8790	0.7282 0.8777 0.8799
		2	0.7216	0.8775	0.8795	0.6888	0.8692	0.8740	
		3	0.7212	0.8783	0.8803	0.7033	0.8705	0.8743	
		4	0.7195	0.8790	0.8812	0.7151	0.8732	0.8765	
		5	0.7163	0.8790	0.8814	0.7213	0.8754	0.8787	
		6	0.7097	0.8783	0.8809	0.7238	0.8775	0.8809	
		7	0.7009	0.8773	0.8802	0.7269	0.8790	0.8823	
		8	0.6877	0.8751	0.8783	0.7144	0.8765	0.8799	
		9	0.6814	0.8750	0.8784	0.6935	0.8748	0.8788	
0.25 m/s	Kobe	1	0.8000	0.9038	0.9059	0.7110	0.8694	0.8741	0.8072 0.9056 0.9082
		2	0.8010	0.9060	0.9083	0.7060	0.8700	0.8742	
		3	0.8008	0.9071	0.9095	0.7245	0.8761	0.8800	
		4	0.7981	0.9075	0.9101	0.7498	0.8842	0.8878	
		5	0.7914	0.9062	0.9088	0.7752	0.8925	0.8958	
		6	0.7748	0.9020	0.9047	0.8098	0.9042	0.9072	
		7	0.7547	0.8967	0.8997	0.8184	0.9094	0.9123	
		8	0.7275	0.8889	0.8920	0.7573	0.8919	0.8953	
		9	0.7176	0.8879	0.8912	0.7228	0.8839	0.8879	
		1	0.9071	0.9601	0.9622	0.9611	0.9804	0.9810	0.9133 0.9610 0.9620

	Mexico SCT	2	0.9008	0.9585	0.9600	0.9450	0.9741	0.9749	
		3	0.8946	0.9568	0.9583	0.9311	0.9678	0.9687	
		4	0.8872	0.9550	0.9563	0.9226	0.9642	0.9652	
		5	0.8809	0.9536	0.9550	0.9160	0.9615	0.9625	
		6	0.8709	0.9515	0.9531	0.9072	0.9578	0.9589	
		7	0.8610	0.9501	0.9517	0.8990	0.9549	0.9560	
		8	0.8453	0.9482	0.9504	0.8832	0.9490	0.9503	
		9	0.8305	0.9482	0.9503	0.8745	0.9473	0.9487	
	Northridge	1	0.6643	0.8478	0.8503	0.6504	0.8706	0.8749	0.6709 0.8495 0.8521
		2	0.6628	0.8485	0.8510	0.6380	0.8605	0.8649	
		3	0.6600	0.8486	0.8511	0.6582	0.8549	0.8584	
		4	0.6551	0.8489	0.8515	0.6722	0.8553	0.8584	
		5	0.6500	0.8485	0.8512	0.6733	0.8574	0.8607	
		6	0.6424	0.8479	0.8506	0.6541	0.8577	0.8616	
		7	0.6358	0.8477	0.8504	0.6454	0.8556	0.8597	
		8	0.6225	0.8485	0.8514	0.6491	0.8484	0.8513	
		9	0.6154	0.8495	0.8525	0.6305	0.8517	0.8549	
	El Centro	1	0.6859	0.8475	0.8496	0.7029	0.8577	0.8621	0.6923 0.8492 0.8515
		2	0.6853	0.8487	0.8509	0.6886	0.8515	0.8552	
		3	0.6844	0.8493	0.8515	0.6896	0.8489	0.8519	
		4	0.6835	0.8501	0.8525	0.6928	0.8493	0.8520	
		5	0.6818	0.8506	0.8530	0.6942	0.8500	0.8527	
		6	0.6791	0.8512	0.8537	0.6948	0.8508	0.8537	
		7	0.6754	0.8516	0.8541	0.6949	0.8521	0.8550	
		8	0.6696	0.8517	0.8543	0.6930	0.8524	0.8553	
		9	0.6652	0.8520	0.8548	0.6830	0.8534	0.8566	
	Taft	1	0.7181	0.8760	0.8779	0.6837	0.8735	0.8790	0.7247 0.8777 0.8799
		2	0.7183	0.8775	0.8795	0.6771	0.8692	0.8740	
		3	0.7175	0.8783	0.8803	0.6948	0.8705	0.8743	
		4	0.7151	0.8790	0.8812	0.7089	0.8732	0.8765	
		5	0.7109	0.8790	0.8814	0.7163	0.8754	0.8787	
		6	0.7025	0.8783	0.8809	0.7199	0.8775	0.8809	
		7	0.6922	0.8773	0.8802	0.7225	0.8790	0.8823	
		8	0.6766	0.8751	0.8783	0.7054	0.8765	0.8799	
		9	0.6706	0.8750	0.8784	0.6814	0.8748	0.8788	

Tabla A.9.- Índices (J7 y J8) de desempeño del marco de nueve niveles Semi-Activo

Escala del Registro	Registro	N	J7			J8		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	1	1.0000	1.0000	1.0000	0.2546	0.2460	0.2456
		2	1.0000	0.4212	0.4413	0.2970	0.0721	0.0721
		3	1.0000	0.3786	0.3958	0.3254	0.0645	0.0646
		4	1.0000	0.2433	0.2538	0.3395	0.0417	0.0418
		5	1.0000	0.1888	0.1966	0.3448	0.0330	0.0332
		6	1.0000	0.2643	0.2613	0.3489	0.0459	0.0465
		7	1.0000	0.2591	0.2492	0.3538	0.0433	0.0440
		8	1.0000	0.5117	0.4941	0.3674	0.0828	0.0845
		9	1.0000	0.1802	0.1722	0.3697	0.0287	0.0295
	Mexico SCT	1	0.2819	0.2587	0.2697	0.0527	0.0542	0.0529
		2	0.3613	0.0704	0.0739	0.0669	0.0149	0.0145
		3	0.4328	0.0625	0.0661	0.0795	0.0132	0.0129
		4	0.4785	0.0401	0.0425	0.0874	0.0085	0.0083

0.25 m/s			5	0.5145	0.0315	0.0333	0.0935	0.0066	0.0065
			6	0.5658	0.0429	0.0455	0.1017	0.0090	0.0088
			7	0.6145	0.0396	0.0419	0.1091	0.0082	0.0081
			8	0.7011	0.0736	0.0771	0.1224	0.0151	0.0148
			9	0.7300	0.0254	0.0269	0.1265	0.0052	0.0051
		Northridge	1	1.0000	0.8617	0.8345	0.1847	0.1852	0.1824
			2	1.0000	0.2363	0.2290	0.2312	0.0510	0.0504
			3	1.0000	0.2097	0.2035	0.2637	0.0455	0.0451
			4	1.0000	0.1468	0.1474	0.2794	0.0295	0.0293
			5	1.0000	0.1248	0.1264	0.2911	0.0232	0.0232
			6	1.0000	0.1779	0.1825	0.3065	0.0318	0.0321
			7	1.0000	0.1556	0.1749	0.3171	0.0298	0.0301
			8	1.0000	0.3582	0.3825	0.3393	0.0575	0.0585
			9	1.0000	0.1362	0.1456	0.3435	0.0201	0.0206
		El Centro	1	1.0000	1.0000	1.0000	0.3364	0.3526	0.3514
			2	1.0000	0.5281	0.5300	0.3917	0.1059	0.1055
			3	1.0000	0.4755	0.4802	0.4303	0.0949	0.0946
			4	1.0000	0.3054	0.3118	0.4525	0.0612	0.0611
			5	1.0000	0.2393	0.2491	0.4680	0.0483	0.0483
			6	1.0000	0.3347	0.3541	0.4881	0.0664	0.0665
			7	1.0000	0.3155	0.3345	0.5029	0.0618	0.0620
			8	1.0000	0.5904	0.6216	0.5302	0.1153	0.1159
			9	1.0000	0.2085	0.2145	0.5327	0.0398	0.0402
		Taft	1	0.8431	0.7666	0.7538	0.2208	0.2272	0.2254
			2	1.0000	0.2231	0.2187	0.2799	0.0625	0.0622
			3	1.0000	0.2113	0.2076	0.3264	0.0560	0.0558
			4	1.0000	0.1428	0.1411	0.3489	0.0362	0.0362
			5	1.0000	0.1127	0.1172	0.3631	0.0287	0.0288
			6	1.0000	0.1685	0.1776	0.3827	0.0400	0.0404
			7	1.0000	0.1659	0.1744	0.3959	0.0378	0.0384
			8	1.0000	0.3219	0.3364	0.4296	0.0727	0.0741
			9	1.0000	0.1116	0.1173	0.4346	0.0253	0.0260
	0.25 m/s	Kobe	1	0.7711	0.7584	0.7984	0.1307	0.1304	0.1302
			2	0.9856	0.2101	0.2204	0.1667	0.0359	0.0359
			3	1.0000	0.1889	0.1978	0.1953	0.0321	0.0322
			4	1.0000	0.1215	0.1270	0.2112	0.0208	0.0208
			5	1.0000	0.0943	0.0985	0.2216	0.0164	0.0166
			6	1.0000	0.1324	0.1307	0.2328	0.0229	0.0231
			7	1.0000	0.1297	0.1247	0.2418	0.0216	0.0219
			8	1.0000	0.2560	0.2471	0.2623	0.0412	0.0421
			9	1.0000	0.0901	0.0861	0.2650	0.0143	0.0147
		Mexico SCT	1	0.1400	0.1294	0.1348	0.0262	0.0271	0.0264
			2	0.1793	0.0352	0.0370	0.0333	0.0074	0.0073
			3	0.2149	0.0312	0.0330	0.0395	0.0066	0.0065
			4	0.2375	0.0200	0.0212	0.0434	0.0042	0.0041
			5	0.2554	0.0157	0.0167	0.0465	0.0033	0.0032
			6	0.2809	0.0214	0.0227	0.0505	0.0045	0.0044
			7	0.3051	0.0198	0.0209	0.0542	0.0041	0.0040
			8	0.3481	0.0368	0.0385	0.0608	0.0075	0.0074
			9	0.3625	0.0127	0.0134	0.0629	0.0026	0.0025
		Northridge	1	0.4846	0.4308	0.4173	0.0867	0.0926	0.0912
			2	0.6326	0.1181	0.1145	0.1096	0.0255	0.0252
			3	0.7467	0.1048	0.1017	0.1289	0.0228	0.0226
			4	0.8395	0.0734	0.0737	0.1404	0.0147	0.0147

		5	0.8971	0.0624	0.0632	0.1495	0.0116	0.0116
		6	0.8947	0.0889	0.0912	0.1608	0.0159	0.0160
		7	0.8898	0.0778	0.0875	0.1700	0.0149	0.0151
		8	0.9993	0.1791	0.1913	0.1936	0.0287	0.0293
		9	1.0000	0.0681	0.0728	0.2001	0.0101	0.0103
	El Centro	1	0.9881	0.9466	0.9424	0.1772	0.1907	0.1899
		2	1.0000	0.2613	0.2623	0.2231	0.0525	0.0523
		3	1.0000	0.2350	0.2377	0.2575	0.0470	0.0469
		4	1.0000	0.1511	0.1544	0.2760	0.0303	0.0303
		5	1.0000	0.1184	0.1234	0.2891	0.0239	0.0239
		6	1.0000	0.1658	0.1759	0.3064	0.0329	0.0330
		7	1.0000	0.1570	0.1667	0.3204	0.0307	0.0308
		8	1.0000	0.2945	0.3117	0.3455	0.0572	0.0576
		9	1.0000	0.1040	0.1081	0.3511	0.0198	0.0199
	Taft	1	0.4162	0.3833	0.3769	0.1074	0.1136	0.1127
		2	0.5422	0.1116	0.1093	0.1365	0.0313	0.0311
		3	0.6631	0.1056	0.1038	0.1621	0.0280	0.0279
		4	0.7402	0.0714	0.0706	0.1772	0.0181	0.0181
		5	0.8047	0.0564	0.0586	0.1877	0.0144	0.0144
		6	0.8775	0.0842	0.0888	0.2023	0.0200	0.0202
		7	0.9260	0.0829	0.0872	0.2148	0.0189	0.0192
		8	1.0000	0.1609	0.1682	0.2449	0.0363	0.0371
		9	1.0000	0.0558	0.0587	0.2503	0.0126	0.0130

Tabla A.10.- Índices (J1, J2 y J3) de desempeño del marco de nueve niveles Activo

Escala del Registro	Registro	N	J1			J2			J3		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	1	0.9530	0.9649	0.9672	1.1732	0.9404	0.9482	0.9623	0.9668	0.9683
		2	0.9369	0.9614	0.9634	1.2342	0.9583	0.9601			
		3	0.9332	0.9684	0.9726	1.1628	0.9576	0.9589			
		4	0.9408	0.9778	0.9825	1.1668	0.9481	0.9493			
		5	0.9474	0.9768	0.9808	1.0864	0.9586	0.9560			
		6	0.9436	0.9722	0.9759	1.0624	0.9679	0.9678			
		7	0.9504	0.9676	0.9717	0.9785	0.9823	0.9897			
		8	0.9716	0.9623	0.9642	1.0635	0.9651	0.9690			
		9	0.9395	0.9630	0.9645	0.9793	0.9605	0.9654			
	Mexico SCT	1	0.8747	0.9538	0.9560	1.0291	0.9686	0.9697	0.8812	0.9548	0.9559
		2	0.8682	0.9529	0.9544	1.0228	0.9643	0.9656			
		3	0.8618	0.9517	0.9532	0.9277	0.9588	0.9597			
		4	0.8554	0.9506	0.9519	0.9083	0.9554	0.9564			
		5	0.8517	0.9499	0.9513	1.0250	0.9531	0.9538			
		6	0.8438	0.9491	0.9507	0.9778	0.9515	0.9527			
		7	0.8373	0.9487	0.9504	0.9106	0.9501	0.9512			
		8	0.8149	0.9483	0.9506	0.8578	0.9486	0.9499			
		9	0.8015	0.9484	0.9504	0.8510	0.9482	0.9492			
	Northridge	1	0.8343	0.9318	0.9338	0.9114	0.9397	0.9545	0.8403	0.9318	0.9333
		2	0.8353	0.9308	0.9329	0.8302	0.8927	0.9083			
		3	0.8306	0.9295	0.9318	0.8836	0.8799	0.8852			
		4	0.8204	0.9288	0.9311	1.2851	0.9312	0.9409			
		5	0.8101	0.9266	0.9290	1.0284	0.9664	0.9802			
		6	0.8002	0.9208	0.9228	0.8570	0.9312	0.9478			
		7	0.8184	0.9155	0.9176	0.9413	0.9442	0.9554			

0.25 m/s	El Centro	8	0.7000	0.9118	0.9223	0.9774	0.9124	0.9227			
		9	0.6976	0.9179	0.9270	0.7818	0.9207	0.9299			
		1	0.9043	0.9445	0.9469	0.8649	0.9015	0.8985	0.9110	0.9453	0.9477
		2	0.8919	0.9441	0.9461	0.8724	0.9431	0.9540			
		3	0.8869	0.9435	0.9448	0.9612	0.9537	0.9576			
		4	0.9146	0.9329	0.9360	0.9800	0.9105	0.9097			
		5	0.9134	0.9338	0.9364	0.9646	0.8949	0.8951			
		6	0.8990	0.9317	0.9326	0.9511	0.9499	0.9470			
		7	0.8881	0.9327	0.9331	0.9821	0.9536	0.9503			
		8	0.8724	0.9320	0.9307	1.0563	0.9336	0.9320			
		9	0.8553	0.9337	0.9329	0.9093	0.9365	0.9350			
	Taft	1	0.9097	0.9431	0.9458	0.7807	0.8413	0.8481	0.9077	0.9311	0.9337
		2	0.9216	0.9731	0.9751	0.8232	0.8485	0.8526			
		3	0.9109	0.9401	0.9443	0.9610	0.9043	0.9093			
		4	0.8515	0.9435	0.9496	1.0402	0.9049	0.9091			
		5	0.8367	0.9430	0.9492	1.1835	0.9275	0.9338			
		6	0.8505	0.9418	0.9477	1.2203	0.9172	0.9260			
		7	0.8451	0.9386	0.9434	1.1247	0.9283	0.9341			
		8	0.7870	0.9313	0.9339	1.0874	0.9398	0.9438			
		9	0.8130	0.9219	0.9250	0.9018	0.9036	0.9091			
	Kobe	1	0.9097	0.9607	0.9630	0.9646	0.9404	0.9482	0.9193	0.9623	0.9638
		2	0.8954	0.9578	0.9599	1.0155	0.9583	0.9601			
		3	0.9203	0.9662	0.9706	1.0469	0.9539	0.9557			
		4	0.9290	0.9740	0.9794	1.0762	0.9468	0.9479			
		5	0.9475	0.9731	0.9786	1.1475	0.9675	0.9698			
		6	0.9419	0.9706	0.9758	1.1729	0.9625	0.9650			
		7	0.9265	0.9688	0.9732	1.0781	0.9760	0.9841			
		8	0.9094	0.9657	0.9680	1.2260	0.9670	0.9718			
		9	0.9128	0.9672	0.9695	1.0351	0.9669	0.9709			
	Mexico SCT	1	0.8753	0.9538	0.9560	0.9731	0.9686	0.9697	0.8819	0.9548	0.9559
		2	0.8689	0.9529	0.9544	0.9168	0.9643	0.9656			
		3	0.8620	0.9517	0.9532	0.9951	0.9588	0.9597			
		4	0.8562	0.9506	0.9519	1.0146	0.9554	0.9564			
		5	0.8525	0.9499	0.9513	1.0188	0.9531	0.9538			
		6	0.8420	0.9491	0.9507	0.8821	0.9515	0.9527			
		7	0.8344	0.9487	0.9504	0.8839	0.9501	0.9512			
		8	0.8167	0.9483	0.9506	0.8657	0.9486	0.9499			
		9	0.8046	0.9484	0.9504	0.8516	0.9482	0.9492			
	Northridge	1	0.8217	0.9318	0.9338	0.8833	0.9397	0.9545	0.8281	0.9318	0.9333
		2	0.8210	0.9308	0.9329	0.7650	0.8927	0.9083			
		3	0.8169	0.9295	0.9318	0.7703	0.8799	0.8852			
		4	0.8111	0.9288	0.9311	1.0321	0.9312	0.9409			
		5	0.8026	0.9266	0.9290	1.1049	0.9664	0.9802			
		6	0.7867	0.9208	0.9228	0.8288	0.9312	0.9478			
		7	0.7880	0.9155	0.9176	0.7920	0.9442	0.9554			
		8	0.7119	0.9118	0.9223	0.9787	0.9124	0.9227			
		9	0.6761	0.9179	0.9270	0.7855	0.9207	0.9299			
	El Centro	1	0.8503	0.9385	0.9413	0.9235	0.8963	0.9008	0.8557	0.9391	0.9420
		2	0.8413	0.9382	0.9404	0.8842	0.9333	0.9461			
		3	0.8390	0.9376	0.9396	0.9053	0.9467	0.9533			
		4	0.8442	0.9247	0.9263	0.8733	0.9089	0.9105			
		5	0.8452	0.9238	0.9257	0.8751	0.9018	0.9062			
		6	0.8360	0.9205	0.9231	1.0055	0.9422	0.9426			
		7	0.8538	0.9237	0.9277	0.9657	0.9346	0.9362			

	Taft	8	0.8506	0.9227	0.9281	0.9370	0.9282	0.9332			
		9	0.8551	0.9222	0.9282	0.9842	0.9252	0.9313			
		1	0.8809	0.9431	0.9458	0.7346	0.8413	0.8481	0.8782	0.9311	0.9337
		2	0.9116	0.9731	0.9751	0.7885	0.8485	0.8526			
		3	0.8954	0.9401	0.9443	1.0727	0.9043	0.9093			
		4	0.8328	0.9435	0.9496	0.9447	0.9049	0.9091			
		5	0.8153	0.9430	0.9492	1.0183	0.9275	0.9338			
		6	0.8044	0.9418	0.9477	1.1919	0.9172	0.9260			
		7	0.7897	0.9386	0.9434	1.1247	0.9283	0.9341			
		8	0.7961	0.9313	0.9339	1.0184	0.9398	0.9438			
		9	0.7965	0.9219	0.9250	0.8098	0.9036	0.9091			

Tabla A.11.- Índices (J4, J5 y J6) de desempeño del marco de nueve niveles Activo

Escala del Registro	Registro	N	J4			J5			J6		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	1	0.8314	0.9068	0.9092	0.7654	0.8806	0.8857	0.8382	0.9085	0.9113
		2	0.8330	0.9087	0.9113	0.7576	0.8804	0.8852			
		3	0.8336	0.9097	0.9123	0.7730	0.8851	0.8895			
		4	0.8325	0.9102	0.9129	0.8009	0.8916	0.8956			
		5	0.8271	0.9092	0.9120	0.8257	0.8983	0.9019			
		6	0.8130	0.9058	0.9089	0.8608	0.9078	0.9109			
		7	0.7959	0.9017	0.9051	0.8645	0.9121	0.9150			
		8	0.7728	0.8955	0.8991	0.8081	0.8979	0.9019			
		9	0.7643	0.8948	0.8985	0.7726	0.8918	0.8962			
	Mexico SCT	1	0.9062	0.9601	0.9623	0.9616	0.9804	0.9811	0.9130	0.9610	0.9621
		2	0.8999	0.9585	0.9601	0.9457	0.9741	0.9749			
		3	0.8934	0.9568	0.9584	0.9318	0.9679	0.9688			
		4	0.8859	0.9550	0.9563	0.9232	0.9642	0.9652			
		5	0.8796	0.9536	0.9550	0.9166	0.9615	0.9626			
		6	0.8693	0.9515	0.9532	0.9075	0.9578	0.9590			
		7	0.8591	0.9501	0.9518	0.8990	0.9549	0.9561			
		8	0.8428	0.9482	0.9505	0.8833	0.9490	0.9503			
		9	0.8277	0.9482	0.9504	0.8743	0.9473	0.9487			
	Northridge	1	0.6710	0.8472	0.8494	0.7276	0.8800	0.8895	0.6784	0.8490	0.8513
		2	0.6691	0.8478	0.8500	0.7002	0.8671	0.8750			
		3	0.6667	0.8481	0.8504	0.7079	0.8572	0.8620			
		4	0.6638	0.8486	0.8512	0.7096	0.8564	0.8602			
		5	0.6603	0.8483	0.8510	0.7134	0.8595	0.8640			
		6	0.6547	0.8478	0.8506	0.6946	0.8617	0.8678			
		7	0.6506	0.8478	0.8506	0.6877	0.8593	0.8652			
		8	0.6446	0.8495	0.8531	0.6767	0.8491	0.8523			
		9	0.6416	0.8509	0.8548	0.6628	0.8539	0.8585			
	El Centro	1	0.7331	0.8548	0.8568	0.7536	0.8685	0.8713	0.7392	0.8563	0.8585
		2	0.7329	0.8558	0.8579	0.7415	0.8613	0.8640			
		3	0.7325	0.8563	0.8584	0.7420	0.8576	0.8600			
		4	0.7324	0.8572	0.8594	0.7451	0.8573	0.8595			
		5	0.7315	0.8577	0.8599	0.7445	0.8577	0.8600			
		6	0.7303	0.8584	0.8607	0.7443	0.8584	0.8610			
		7	0.7287	0.8590	0.8612	0.7445	0.8597	0.8622			
		8	0.7255	0.8595	0.8616	0.7467	0.8601	0.8625			
		9	0.7207	0.8599	0.8621	0.7367	0.8615	0.8641			
	Taft	1	0.7221	0.8757	0.8779	0.7346	0.8821	0.8889	0.7293	0.8774	0.8799

		2	0.7219	0.8771	0.8794	0.7194	0.8754	0.8811			
		3	0.7210	0.8779	0.8803	0.7272	0.8737	0.8781			
		4	0.7196	0.8788	0.8814	0.7405	0.8753	0.8791			
		5	0.7170	0.8789	0.8817	0.7462	0.8775	0.8812			
		6	0.7116	0.8787	0.8817	0.7484	0.8799	0.8839			
		7	0.7062	0.8782	0.8815	0.7469	0.8811	0.8851			
		8	0.6956	0.8772	0.8808	0.7374	0.8781	0.8819			
		9	0.6903	0.8774	0.8812	0.7126	0.8778	0.8825			
0.25 m/s	Kobe	1	0.7992	0.9033	0.9056	0.7478	0.8754	0.8805	0.8068	0.9051	0.9079
		2	0.7995	0.9053	0.9079	0.7398	0.8754	0.8800			
		3	0.7989	0.9064	0.9090	0.7547	0.8803	0.8846			
		4	0.7965	0.9069	0.9097	0.7745	0.8872	0.8911			
		5	0.7906	0.9058	0.9087	0.7916	0.8943	0.8979			
		6	0.7780	0.9023	0.9054	0.8185	0.9043	0.9075			
		7	0.7624	0.8980	0.9013	0.8228	0.9088	0.9119			
		8	0.7403	0.8915	0.8949	0.7766	0.8940	0.8979			
		9	0.7364	0.8908	0.8943	0.7444	0.8876	0.8919			
	Mexico SCT	1	0.9066	0.9601	0.9623	0.9617	0.9804	0.9811	0.9133	0.9610	0.9621
		2	0.9003	0.9585	0.9601	0.9461	0.9741	0.9749			
		3	0.8939	0.9568	0.9584	0.9323	0.9679	0.9688			
		4	0.8866	0.9550	0.9563	0.9240	0.9642	0.9652			
		5	0.8802	0.9536	0.9550	0.9170	0.9615	0.9626			
		6	0.8700	0.9515	0.9532	0.9079	0.9578	0.9590			
		7	0.8600	0.9501	0.9518	0.8994	0.9549	0.9561			
		8	0.8438	0.9482	0.9505	0.8836	0.9490	0.9503			
		9	0.8291	0.9482	0.9504	0.8748	0.9473	0.9487			
	Northridge	1	0.6620	0.8472	0.8494	0.7193	0.8800	0.8895	0.6690	0.8490	0.8513
		2	0.6598	0.8478	0.8500	0.6946	0.8671	0.8750			
		3	0.6574	0.8481	0.8504	0.6914	0.8572	0.8620			
		4	0.6544	0.8486	0.8512	0.6982	0.8564	0.8602			
		5	0.6502	0.8483	0.8510	0.6996	0.8595	0.8640			
		6	0.6451	0.8478	0.8506	0.6902	0.8617	0.8678			
		7	0.6407	0.8478	0.8506	0.6744	0.8593	0.8652			
		8	0.6363	0.8495	0.8531	0.6618	0.8491	0.8523			
		9	0.6326	0.8509	0.8548	0.6569	0.8539	0.8585			
	El Centro	1	0.6855	0.8472	0.8493	0.7199	0.8619	0.8665	0.6922	0.8488	0.8512
		2	0.6846	0.8483	0.8505	0.7013	0.8545	0.8584			
		3	0.6835	0.8489	0.8512	0.6997	0.8504	0.8536			
		4	0.6826	0.8498	0.8522	0.7001	0.8501	0.8530			
		5	0.6811	0.8503	0.8528	0.7011	0.8506	0.8534			
		6	0.6784	0.8511	0.8537	0.7039	0.8514	0.8543			
		7	0.6753	0.8518	0.8545	0.7037	0.8525	0.8555			
		8	0.6702	0.8525	0.8552	0.7049	0.8530	0.8560			
		9	0.6649	0.8529	0.8558	0.6908	0.8547	0.8581			
	Taft	1	0.7171	0.8757	0.8779	0.7231	0.8821	0.8889	0.7242	0.8774	0.8799
		2	0.7167	0.8771	0.8794	0.7102	0.8754	0.8811			
		3	0.7157	0.8779	0.8803	0.7203	0.8737	0.8781			
		4	0.7139	0.8788	0.8814	0.7304	0.8753	0.8791			
		5	0.7107	0.8789	0.8817	0.7346	0.8775	0.8812			
		6	0.7046	0.8787	0.8817	0.7386	0.8799	0.8839			
		7	0.6985	0.8782	0.8815	0.7329	0.8811	0.8851			
		8	0.6884	0.8772	0.8808	0.7231	0.8781	0.8819			
		9	0.6846	0.8774	0.8812	0.7017	0.8778	0.8825			

Tabla A.12.- Índices (J7 y J8) de desempeño del marco de nueve niveles Activo

Escala del Registro	Registro	N	J7			J8		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	1	1.0000	1.0000	1.0000	0.2555	0.2461	0.2461
		2	1.0000	0.4215	0.4417	0.2976	0.0720	0.0721
		3	1.0000	0.3789	0.3962	0.3267	0.0644	0.0646
		4	1.0000	0.2432	0.2537	0.3403	0.0416	0.0418
		5	1.0000	0.1886	0.1966	0.3499	0.0330	0.0333
		6	1.0000	0.2646	0.2614	0.3630	0.0461	0.0467
		7	1.0000	0.2598	0.2497	0.3734	0.0437	0.0444
		8	1.0000	0.5141	0.4959	0.3912	0.0838	0.0854
		9	1.0000	0.1802	0.1722	0.3925	0.0291	0.0298
	Mexico SCT	1	0.2819	0.2587	0.2697	0.0529	0.0542	0.0529
		2	0.3592	0.0704	0.0739	0.0671	0.0149	0.0145
		3	0.4328	0.0625	0.0661	0.0797	0.0132	0.0129
		4	0.4794	0.0401	0.0424	0.0876	0.0085	0.0083
		5	0.5158	0.0315	0.0333	0.0937	0.0066	0.0065
		6	0.5654	0.0429	0.0455	0.1019	0.0090	0.0088
		7	0.6137	0.0396	0.0419	0.1093	0.0082	0.0081
		8	0.7016	0.0736	0.0771	0.1226	0.0151	0.0148
		9	0.7253	0.0254	0.0269	0.1266	0.0052	0.0051
	Northridge	1	1.0000	0.8618	0.8342	0.1864	0.1855	0.1830
		2	1.0000	0.2362	0.2289	0.2330	0.0510	0.0504
		3	1.0000	0.2095	0.2033	0.2670	0.0457	0.0453
		4	1.0000	0.1469	0.1478	0.2856	0.0296	0.0295
		5	1.0000	0.1254	0.1271	0.2982	0.0233	0.0233
		6	1.0000	0.1776	0.1829	0.3148	0.0320	0.0322
		7	1.0000	0.1557	0.1755	0.3267	0.0299	0.0303
		8	1.0000	0.3593	0.3859	0.3496	0.0577	0.0588
		9	1.0000	0.1364	0.1473	0.3528	0.0202	0.0208
	El Centro	1	1.0000	1.0000	1.0000	0.3380	0.3525	0.3515
		2	1.0000	0.5282	0.5298	0.3931	0.1059	0.1055
		3	1.0000	0.4754	0.4802	0.4328	0.0948	0.0946
		4	1.0000	0.3058	0.3120	0.4549	0.0612	0.0611
		5	1.0000	0.2395	0.2493	0.4712	0.0483	0.0483
		6	1.0000	0.3353	0.3549	0.4945	0.0665	0.0666
		7	1.0000	0.3154	0.3348	0.5125	0.0620	0.0622
		8	1.0000	0.5923	0.6205	0.5459	0.1163	0.1169
		9	1.0000	0.2085	0.2145	0.5515	0.0402	0.0405
	Taft	1	0.8430	0.7650	0.7528	0.2225	0.2272	0.2258
		2	1.0000	0.2233	0.2189	0.2819	0.0625	0.0622
		3	1.0000	0.2116	0.2082	0.3288	0.0561	0.0559
		4	1.0000	0.1434	0.1417	0.3527	0.0363	0.0363
		5	1.0000	0.1129	0.1171	0.3691	0.0288	0.0289
		6	1.0000	0.1691	0.1781	0.3927	0.0403	0.0407
		7	1.0000	0.1664	0.1747	0.4121	0.0382	0.0387
		8	1.0000	0.3221	0.3375	0.4490	0.0738	0.0752
		9	1.0000	0.1113	0.1179	0.4558	0.0257	0.0263
0.25 m/s	Kobe	1	0.7858	0.7587	0.7988	0.1316	0.1304	0.1305
		2	1.0000	0.2103	0.2206	0.1675	0.0359	0.0359
		3	1.0000	0.1890	0.1980	0.1961	0.0321	0.0322
		4	1.0000	0.1215	0.1270	0.2116	0.0207	0.0208

		5	1.0000	0.0943	0.0985	0.2219	0.0165	0.0166
		6	1.0000	0.1326	0.1307	0.2354	0.0230	0.0232
		7	1.0000	0.1300	0.1249	0.2474	0.0218	0.0221
		8	1.0000	0.2572	0.2480	0.2700	0.0417	0.0425
		9	1.0000	0.0901	0.0861	0.2743	0.0145	0.0148
	Mexico SCT	1	0.1398	0.1294	0.1348	0.0263	0.0271	0.0265
		2	0.1786	0.0352	0.0370	0.0334	0.0074	0.0073
		3	0.2147	0.0312	0.0330	0.0396	0.0066	0.0065
		4	0.2379	0.0200	0.0212	0.0435	0.0042	0.0041
		5	0.2556	0.0157	0.0167	0.0465	0.0033	0.0032
		6	0.2809	0.0214	0.0227	0.0506	0.0045	0.0044
		7	0.3051	0.0198	0.0210	0.0543	0.0041	0.0040
		8	0.3476	0.0368	0.0385	0.0609	0.0075	0.0074
		9	0.3607	0.0127	0.0135	0.0629	0.0026	0.0025
	Northridge	1	0.4840	0.4309	0.4171	0.0878	0.0927	0.0915
		2	0.6252	0.1181	0.1145	0.1107	0.0255	0.0252
		3	0.7791	0.1047	0.1016	0.1304	0.0228	0.0227
		4	0.8587	0.0734	0.0739	0.1428	0.0148	0.0147
		5	0.9125	0.0627	0.0636	0.1524	0.0116	0.0117
		6	0.9632	0.0888	0.0915	0.1646	0.0160	0.0161
		7	0.8827	0.0779	0.0877	0.1754	0.0149	0.0151
		8	0.9948	0.1797	0.1929	0.1968	0.0289	0.0294
		9	1.0000	0.0682	0.0737	0.2031	0.0101	0.0104
	El Centro	1	1.0000	0.9474	0.9432	0.1776	0.1907	0.1900
		2	1.0000	0.2613	0.2622	0.2231	0.0525	0.0523
		3	1.0000	0.2350	0.2376	0.2579	0.0470	0.0469
		4	1.0000	0.1512	0.1544	0.2765	0.0303	0.0303
		5	1.0000	0.1185	0.1234	0.2899	0.0239	0.0239
		6	1.0000	0.1661	0.1763	0.3081	0.0330	0.0330
		7	1.0000	0.1570	0.1669	0.3241	0.0308	0.0309
		8	1.0000	0.2952	0.3114	0.3537	0.0577	0.0580
		9	1.0000	0.1040	0.1081	0.3600	0.0200	0.0201
	Taft	1	0.4116	0.3825	0.3764	0.1082	0.1136	0.1129
		2	0.5381	0.1116	0.1095	0.1373	0.0313	0.0311
		3	0.6579	0.1058	0.1041	0.1628	0.0280	0.0279
		4	0.7442	0.0717	0.0709	0.1783	0.0182	0.0182
		5	0.8044	0.0565	0.0585	0.1897	0.0144	0.0145
		6	0.8803	0.0846	0.0890	0.2057	0.0201	0.0203
		7	0.9333	0.0832	0.0874	0.2203	0.0191	0.0194
		8	1.0000	0.1611	0.1687	0.2516	0.0369	0.0376
		9	1.0000	0.0556	0.0590	0.2569	0.0129	0.0132

Tabla A.13.- Índices (J1, J2 y J3) de desempeño del marco de 20 niveles Semi-Activo

Escala del Registro	Registro	N	J1			J2			J3		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	1	0.9064	0.9077	0.9081	0.9133	0.9610	0.9293	0.9248	0.9189	0.9200
		2	0.9128	0.9143	0.9186	0.7801	1.0100	0.9915			
		3	0.9301	0.9300	0.9370	0.8220	0.8713	0.8577			
		4	0.9510	0.9510	0.9554	0.8637	0.8483	0.8384			
		5	0.9572	0.9574	0.9616	0.8977	0.8749	0.8701			
		6	0.9577	0.9596	0.9653	1.0827	0.9767	0.9789			
		7	0.9612	0.9610	0.9683	1.0461	0.9880	0.9908			

		8	0.9620	0.9605	0.9661	0.8789	0.7980	0.7900			
		9	0.9706	0.9679	0.9742	0.8980	0.8088	0.8273			
		10	0.9867	0.9790	0.9857	1.0382	0.8412	0.8401			
		11	0.9630	0.9264	0.9297	1.2520	0.8761	0.8637			
		12	0.9177	0.9253	0.9303	1.2235	0.8728	0.8855			
		13	0.8933	0.9214	0.9245	1.0763	0.9122	0.9153			
		14	0.8798	0.9214	0.9237	1.0715	0.9395	0.9360			
		15	0.8701	0.9239	0.9245	1.3001	0.9970	0.9825			
		16	0.8713	0.9176	0.9185	1.1165	0.9383	0.9438			
		17	0.8956	0.9115	0.9120	1.1940	0.9215	0.9195			
		18	0.8995	0.9109	0.9103	1.1375	0.9082	0.8974			
		19	0.9002	0.9148	0.9169	1.1412	0.9204	0.9194			
		20	0.8990	0.9171	0.9184	0.8982	0.9116	0.9126			
	Mexico SCT	1	0.9912	1.0136	1.0201	1.0892	1.0000	1.0317	0.9951	1.0147	1.0201
		2	0.9901	1.0146	1.0199	1.0519	0.9962	1.0584			
		3	0.9897	1.0155	1.0194	1.1311	1.0042	1.0359			
		4	0.9891	1.0157	1.0191	1.2147	1.0023	1.0303			
		5	0.9880	1.0155	1.0185	1.2632	1.0097	1.0237			
		6	0.9857	1.0149	1.0179	1.2658	1.0146	1.0281			
		7	0.9837	1.0147	1.0174	1.2531	1.0196	1.0277			
		8	0.9801	1.0138	1.0173	1.2509	1.0187	1.0330			
		9	0.9823	1.0142	1.0169	1.2875	1.0202	1.0211			
		10	0.9848	1.0147	1.0169	1.4333	1.0099	1.0147			
		11	0.9873	1.0163	1.0172	1.4580	1.0081	1.0096			
		12	0.9869	1.0174	1.0178	1.3393	1.0082	1.0096			
		13	0.9796	1.0182	1.0190	1.2852	1.0016	1.0030			
		14	0.9772	1.0181	1.0200	1.2839	1.0032	1.0075			
		15	0.9650	1.0165	1.0205	1.3253	1.0170	1.0179			
		16	0.9724	1.0166	1.0199	1.3504	1.0210	1.0215			
		17	0.9827	1.0166	1.0199	1.6080	1.0219	1.0236			
		18	0.9996	1.0164	1.0204	1.6560	1.0206	1.0229			
		19	0.9937	1.0155	1.0204	1.4530	1.0178	1.0234			
		20	0.9484	1.0151	1.0202	1.1485	1.0195	1.0228			
	Northridge	1	0.9258	0.9090	0.9143	0.9023	0.9835	1.0654	0.9294	0.9107	0.9162
		2	0.9281	0.9141	0.9195	0.8088	0.8889	0.8753			
		3	0.9326	0.9225	0.9280	1.0318	0.9169	0.9223			
		4	0.9354	0.9302	0.9359	1.0101	0.9120	0.9375			
		5	0.9381	0.9352	0.9408	0.8350	0.8723	0.9170			
		6	0.9382	0.9406	0.9459	0.7686	0.8385	0.8146			
		7	0.9375	0.9450	0.9502	0.7800	0.9039	0.9206			
		8	0.9372	0.9506	0.9549	1.2565	0.9240	0.9387			
		9	0.9435	0.9546	0.9586	1.2576	0.8573	0.8720			
		10	0.9443	0.9549	0.9586	1.2321	0.7794	0.8042			
		11	0.9390	0.9491	0.9524	1.4030	0.7786	0.7852			
		12	0.9354	0.9376	0.9411	1.4119	0.8644	0.8692			
		13	0.9088	0.9206	0.9241	1.2151	0.9415	0.9221			
		14	0.8904	0.9181	0.9211	1.2541	0.8618	0.9282			
		15	0.8651	0.9181	0.9218	1.4125	0.9553	0.9516			
		16	0.8614	0.9195	0.9228	1.5018	0.9378	0.9401			
		17	0.8730	0.9208	0.9236	1.6365	0.9110	0.9171			
		18	0.9122	0.9199	0.9223	1.7540	0.9245	0.9249			
		19	0.8935	0.9132	0.9164	1.5228	0.9264	0.9215			
		20	0.8545	0.9051	0.9101	1.0321	0.8236	0.8303			
	El Centro	1	0.9117	0.8914	0.8935	0.9954	0.8923	0.8876	0.9057	0.8969	0.8995

		2	0.9250	0.9130	0.9156	0.9208	0.8787	0.8584			
		3	0.9174	0.9158	0.9175	0.8777	0.8033	0.8186			
		4	0.9156	0.9159	0.9185	0.9502	0.7675	0.7966			
		5	0.9019	0.8987	0.9015	0.9210	0.7909	0.8085			
		6	0.8742	0.8693	0.8711	0.8919	0.7705	0.7766			
		7	0.8586	0.8601	0.8614	0.8580	0.7797	0.7764			
		8	0.8423	0.8489	0.8516	0.8551	0.8994	0.8907			
		9	0.8434	0.8551	0.8570	0.8871	0.8781	0.8695			
		10	0.8346	0.8559	0.8589	1.0890	0.9067	0.9183			
		11	0.8307	0.8475	0.8512	1.3426	0.9405	0.9575			
		12	0.8203	0.8415	0.8451	1.2860	0.9440	0.9663			
		13	0.8159	0.8370	0.8402	1.1054	0.9143	0.9078			
		14	0.8166	0.8365	0.8399	1.0064	0.8942	0.8945			
		15	0.8422	0.8477	0.8512	0.9477	0.8638	0.8589			
		16	0.8651	0.8700	0.8742	0.9623	0.8694	0.8710			
		17	0.8702	0.8883	0.8916	1.1949	0.8882	0.8916			
		18	0.8941	0.9038	0.9051	1.2720	0.9098	0.9096			
		19	0.8849	0.8833	0.8824	1.0941	0.9206	0.9188			
		20	0.8551	0.8703	0.8680	0.9348	0.9231	0.9178			
	Taft	1	0.8718	0.8593	0.8634	0.9790	0.8609	0.8552	0.8762	0.8590	0.8632
		2	0.8716	0.8609	0.8650	0.8115	0.8614	0.8425			
		3	0.8705	0.8658	0.8690	0.8113	0.8912	0.8769			
		4	0.8666	0.8661	0.8687	0.9206	0.9028	0.9131			
		5	0.8601	0.8638	0.8667	0.8844	0.8445	0.8467			
		6	0.8522	0.8601	0.8644	0.9058	0.8630	0.8603			
		7	0.8513	0.8590	0.8637	0.8723	0.8615	0.8407			
		8	0.8520	0.8574	0.8609	0.9529	0.8974	0.8886			
		9	0.8573	0.8593	0.8625	0.9771	0.8652	0.8741			
		10	0.8614	0.8623	0.8655	1.0106	0.8939	0.8864			
		11	0.8676	0.8660	0.8689	1.0518	0.8887	0.8830			
		12	0.8640	0.8672	0.8696	0.9591	0.9022	0.9099			
		13	0.8388	0.8759	0.8756	0.9888	0.9439	0.9666			
		14	0.8305	0.8771	0.8763	0.9664	0.8393	0.8456			
		15	0.8236	0.8739	0.8736	0.9609	0.8784	0.8803			
		16	0.8158	0.8733	0.8724	1.0197	0.8935	0.8872			
		17	0.8137	0.8703	0.8696	1.0837	0.8796	0.8811			
		18	0.8371	0.8662	0.8670	1.1011	0.8680	0.8736			
		19	0.8382	0.8706	0.8686	1.0202	0.8618	0.8621			
		20	0.8223	0.8747	0.8736	0.8463	0.8587	0.8557			
0.25 m/s	Kobe	1	0.9101	0.9028	0.9036	0.8540	0.9285	0.9626	0.9285	0.9010	0.9081
		2	0.9183	0.9094	0.9132	0.8130	0.9506	0.8343			
		3	0.9288	0.9219	0.9284	0.7856	0.8202	0.7595			
		4	0.9424	0.9398	0.9479	0.8049	0.8198	0.7959			
		5	0.9498	0.9474	0.9566	0.8155	0.8374	0.8503			
		6	0.9511	0.9532	0.9628	0.9848	0.9202	0.9442			
		7	0.9513	0.9568	0.9678	1.0426	0.9453	0.9637			
		8	0.9536	0.9586	0.9678	0.8345	0.7823	0.7732			
		9	0.9639	0.9673	0.9762	0.8219	0.7824	0.7967			
		10	0.9715	0.9814	0.9911	1.0101	0.8282	0.8188			
		11	0.9515	0.9255	0.9335	1.2271	0.8579	0.8638			
		12	0.9237	0.9105	0.9194	1.3061	0.8784	0.8806			
		13	0.8924	0.9033	0.9114	1.1343	0.8916	0.9088			
		14	0.8820	0.9023	0.9115	1.1652	0.9219	0.9234			
		15	0.8762	0.9029	0.9122	1.2728	0.9964	0.9851			

		16	0.8800	0.8950	0.9047	1.3846	0.9395	0.9373			
		17	0.8880	0.8863	0.8980	1.3969	0.9096	0.9197			
		18	0.9057	0.8824	0.8948	1.4355	0.8812	0.8887			
		19	0.9025	0.8880	0.9004	1.2711	0.8885	0.9098			
		20	0.9125	0.8904	0.9003	0.9269	0.8796	0.8905			
	Mexico SCT	1	0.9895	1.0096	1.0159	1.0988	0.9933	1.0272	0.9932	1.0116	1.0164
		2	0.9892	1.0103	1.0157	1.0259	0.9981	1.0529			
		3	0.9893	1.0108	1.0153	1.1387	0.9997	1.0180			
		4	0.9897	1.0107	1.0149	1.1947	1.0005	1.0156			
		5	0.9897	1.0100	1.0142	1.2161	1.0016	1.0150			
		6	0.9853	1.0086	1.0132	1.0899	1.0044	1.0182			
		7	0.9829	1.0078	1.0125	1.1161	1.0115	1.0298			
		8	0.9813	1.0065	1.0120	1.1752	1.0091	1.0174			
		9	0.9810	1.0066	1.0117	1.2325	1.0144	1.0194			
		10	0.9819	1.0068	1.0117	1.2725	1.0080	1.0156			
		11	0.9840	1.0075	1.0122	1.2838	1.0062	1.0082			
		12	0.9863	1.0082	1.0129	1.3332	1.0041	1.0095			
		13	0.9767	1.0084	1.0136	1.2400	0.9929	0.9995			
		14	0.9733	1.0082	1.0136	1.2113	0.9962	1.0027			
		15	0.9684	1.0066	1.0131	1.1921	1.0081	1.0153			
		16	0.9762	1.0067	1.0124	1.2760	1.0120	1.0135			
		17	0.9885	1.0068	1.0123	1.5435	1.0107	1.0149			
		18	1.0039	1.0069	1.0125	1.6837	1.0109	1.0151			
		19	0.9887	1.0064	1.0127	1.4442	1.0102	1.0148			
		20	0.9541	1.0062	1.0131	1.1328	1.0104	1.0158			
	Northridge	1	0.9234	0.9065	0.9123	0.9072	0.9835	1.0654	0.9281	0.9078	0.9138
		2	0.9254	0.9104	0.9164	0.8059	0.8889	0.8753			
		3	0.9296	0.9172	0.9236	1.0070	0.9169	0.9223			
		4	0.9344	0.9233	0.9300	1.0320	0.9120	0.9375			
		5	0.9372	0.9269	0.9334	0.8748	0.8723	0.9170			
		6	0.9378	0.9303	0.9366	0.7841	0.8385	0.8146			
		7	0.9389	0.9324	0.9385	0.7843	0.9038	0.9206			
		8	0.9409	0.9345	0.9402	1.0996	0.9234	0.9328			
		9	0.9479	0.9361	0.9415	1.2353	0.8586	0.8673			
		10	0.9422	0.9338	0.9387	1.1828	0.7794	0.8042			
		11	0.9375	0.9259	0.9307	1.2504	0.7778	0.7824			
		12	0.9300	0.9143	0.9189	1.1873	0.8538	0.8613			
		13	0.9099	0.8961	0.9004	1.1290	0.9415	0.9221			
		14	0.8964	0.8834	0.8882	1.1738	0.8618	0.9282			
		15	0.8808	0.8812	0.8860	1.3231	0.9255	0.9311			
		16	0.8788	0.8807	0.8854	1.4380	0.9072	0.9076			
		17	0.8755	0.8800	0.8847	1.7001	0.8740	0.8774			
		18	0.8854	0.8776	0.8824	1.7936	0.8818	0.8835			
		19	0.8761	0.8739	0.8789	1.6009	0.8767	0.8809			
		20	0.8634	0.8687	0.8733	0.9950	0.8138	0.7967			
	El Centro	1	0.9139	0.8782	0.8831	0.9863	0.8894	0.8860	0.9078	0.8813	0.8878
		2	0.9284	0.8973	0.9038	0.9644	0.8689	0.8587			
		3	0.9245	0.8941	0.9018	0.9364	0.8023	0.8183			
		4	0.9224	0.8924	0.9008	0.9202	0.7635	0.7941			
		5	0.9043	0.8751	0.8836	0.8902	0.7926	0.8074			
		6	0.8765	0.8559	0.8593	0.8564	0.7606	0.7758			
		7	0.8627	0.8500	0.8539	0.8312	0.7723	0.7753			
		8	0.8426	0.8419	0.8461	0.8651	0.8985	0.8944			
		9	0.8430	0.8428	0.8480	0.9098	0.8733	0.8724			

		10	0.8361	0.8373	0.8433	1.1262	0.9172	0.9196			
		11	0.8263	0.8172	0.8246	1.3480	0.9511	0.9563			
		12	0.8199	0.8115	0.8189	1.3820	0.9677	0.9843			
		13	0.8109	0.8104	0.8191	1.1463	0.8816	0.8938			
		14	0.8128	0.8137	0.8239	1.0770	0.8605	0.8688			
		15	0.8443	0.8441	0.8514	0.9202	0.8545	0.8575			
		16	0.8606	0.8679	0.8754	1.0265	0.8510	0.8611			
		17	0.8819	0.8872	0.8944	1.0974	0.8828	0.8943			
		18	0.8969	0.9029	0.9091	1.1592	0.9100	0.9136			
		19	0.8566	0.8819	0.8868	1.0973	0.9223	0.9226			
		20	0.8190	0.8672	0.8721	0.8807	0.9188	0.9240			
	Taft	1	0.8575	0.8520	0.8570	0.9673	0.8245	0.8356	0.8650	0.8527	0.8577
		2	0.8605	0.8508	0.8557	0.8123	0.8055	0.8104			
		3	0.8628	0.8505	0.8548	0.8591	0.8248	0.8285			
		4	0.8601	0.8469	0.8510	0.8684	0.8210	0.8387			
		5	0.8558	0.8409	0.8453	0.8212	0.8249	0.8467			
		6	0.8513	0.8330	0.8387	0.8564	0.8638	0.8603			
		7	0.8484	0.8294	0.8358	0.8861	0.8605	0.8407			
		8	0.8460	0.8260	0.8329	0.9519	0.8421	0.8379			
		9	0.8465	0.8292	0.8355	0.8886	0.8425	0.8426			
		10	0.8477	0.8337	0.8395	1.1895	0.8629	0.8628			
		11	0.8514	0.8376	0.8428	1.4185	0.8573	0.8562			
		12	0.8534	0.8375	0.8412	1.2123	0.8743	0.8837			
		13	0.8345	0.8468	0.8519	0.9524	0.9247	0.9440			
		14	0.8369	0.8448	0.8498	0.9222	0.8280	0.8338			
		15	0.8270	0.8400	0.8455	1.0788	0.8575	0.8601			
		16	0.8173	0.8385	0.8439	1.0953	0.8475	0.8568			
		17	0.8216	0.8352	0.8417	1.1449	0.8505	0.8511			
		18	0.8357	0.8322	0.8387	1.1882	0.8460	0.8512			
		19	0.8366	0.8345	0.8394	1.0101	0.8233	0.8302			
		20	0.8164	0.8358	0.8428	0.8420	0.8177	0.8211			

Tabla A.14.- Índices (J4, J5 y J6) de desempeño del marco de 20 niveles Semi-Activo

Escala del Registro	Registro	N	J4			J5			J6		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	1	0.8355	0.8251	0.8277	0.7661	0.8063	0.8078	0.8387	0.8270	0.8300
		2	0.8370	0.8270	0.8299	0.7374	0.7811	0.7829			
		3	0.8390	0.8294	0.8325	0.7321	0.7747	0.7762			
		4	0.8405	0.8313	0.8345	0.7363	0.7758	0.7768			
		5	0.8411	0.8324	0.8358	0.7448	0.7797	0.7807			
		6	0.8403	0.8330	0.8363	0.7663	0.7893	0.7897			
		7	0.8392	0.8331	0.8364	0.7862	0.8015	0.8014			
		8	0.8373	0.8330	0.8359	0.8037	0.8066	0.8082			
		9	0.8368	0.8334	0.8366	0.8063	0.8018	0.8040			
		10	0.8363	0.8337	0.8370	0.8344	0.7974	0.8003			
		11	0.8355	0.8336	0.8368	0.8769	0.7967	0.7999			
		12	0.8330	0.8329	0.8361	0.8448	0.7984	0.8021			
		13	0.8264	0.8308	0.8336	0.8252	0.8066	0.8107			
		14	0.8211	0.8283	0.8310	0.8330	0.8202	0.8241			
		15	0.8133	0.8250	0.8271	0.8588	0.8334	0.8365			
		16	0.8081	0.8231	0.8255	0.8663	0.8287	0.8316			
		17	0.8029	0.8215	0.8239	0.9066	0.8232	0.8260			

		18	0.7968	0.8199	0.8225	0.9303	0.8207	0.8234			
		19	0.7983	0.8219	0.8244	0.8722	0.8180	0.8206			
		20	0.7916	0.8232	0.8253	0.8065	0.8153	0.8178			
	Mexico SCT	1	0.9309	0.9370	0.9426	0.9731	0.9642	0.9668	0.9344	0.9391	0.9427
		2	0.9294	0.9368	0.9415	0.9651	0.9619	0.9648			
		3	0.9276	0.9362	0.9405	0.9608	0.9572	0.9602			
		4	0.9260	0.9355	0.9396	0.9591	0.9549	0.9579			
		5	0.9244	0.9348	0.9389	0.9548	0.9534	0.9565			
		6	0.9223	0.9337	0.9381	0.9503	0.9500	0.9531			
		7	0.9208	0.9331	0.9375	0.9469	0.9491	0.9524			
		8	0.9182	0.9321	0.9372	0.9409	0.9395	0.9430			
		9	0.9165	0.9319	0.9365	0.9398	0.9387	0.9424			
		10	0.9144	0.9315	0.9359	0.9411	0.9370	0.9407			
		11	0.9124	0.9311	0.9354	0.9440	0.9365	0.9401			
		12	0.9108	0.9308	0.9351	0.9381	0.9361	0.9398			
		13	0.9076	0.9300	0.9346	0.9332	0.9347	0.9384			
		14	0.9049	0.9296	0.9342	0.9311	0.9346	0.9383			
		15	0.9009	0.9290	0.9343	0.9294	0.9304	0.9343			
		16	0.8984	0.9289	0.9338	0.9601	0.9302	0.9341			
		17	0.9026	0.9289	0.9335	1.0756	0.9296	0.9335			
		18	0.9003	0.9288	0.9332	1.1351	0.9296	0.9335			
		19	0.8965	0.9291	0.9337	1.0588	0.9293	0.9332			
		20	0.8834	0.9292	0.9346	0.9434	0.9288	0.9328			
	Northridge	1	0.7760	0.7789	0.7829	0.7888	0.8141	0.8194	0.7798	0.7810	0.7849
		2	0.7750	0.7792	0.7832	0.7739	0.7884	0.7957			
		3	0.7739	0.7794	0.7834	0.7834	0.7832	0.7898			
		4	0.7729	0.7794	0.7834	0.7913	0.7860	0.7920			
		5	0.7719	0.7793	0.7832	0.7909	0.7912	0.7968			
		6	0.7704	0.7789	0.7828	0.7910	0.7962	0.8017			
		7	0.7693	0.7788	0.7827	0.7894	0.7991	0.8044			
		8	0.7673	0.7784	0.7823	0.7852	0.7841	0.7889			
		9	0.7662	0.7787	0.7827	0.7840	0.7798	0.7843			
		10	0.7650	0.7790	0.7830	0.7910	0.7759	0.7805			
		11	0.7642	0.7793	0.7833	0.8026	0.7753	0.7800			
		12	0.7633	0.7794	0.7835	0.7901	0.7761	0.7809			
		13	0.7610	0.7794	0.7834	0.7806	0.7778	0.7826			
		14	0.7594	0.7793	0.7834	0.7787	0.7803	0.7850			
		15	0.7566	0.7789	0.7829	0.7863	0.7793	0.7838			
		16	0.7566	0.7790	0.7832	0.8265	0.7801	0.7844			
		17	0.7567	0.7791	0.7833	0.9343	0.7801	0.7843			
		18	0.7530	0.7792	0.7835	0.9928	0.7802	0.7845			
		19	0.7480	0.7790	0.7833	0.9063	0.7801	0.7845			
		20	0.7335	0.7788	0.7830	0.7871	0.7794	0.7840			
	El Centro	1	0.8371	0.8427	0.8467	0.8121	0.8221	0.8278	0.8405	0.8449	0.8488
		2	0.8384	0.8453	0.8493	0.7920	0.8012	0.8073			
		3	0.8404	0.8482	0.8522	0.7858	0.7939	0.8004			
		4	0.8424	0.8508	0.8548	0.7855	0.7922	0.7986			
		5	0.8438	0.8526	0.8567	0.7854	0.7922	0.7982			
		6	0.8441	0.8536	0.8576	0.7862	0.7931	0.7987			
		7	0.8432	0.8534	0.8575	0.7862	0.7958	0.8006			
		8	0.8402	0.8520	0.8559	0.8016	0.8057	0.8104			
		9	0.8372	0.8503	0.8546	0.8196	0.8157	0.8202			
		10	0.8322	0.8470	0.8514	0.8574	0.8259	0.8307			
		11	0.8270	0.8431	0.8477	0.9057	0.8335	0.8383			

0.25 m/s		12	0.8224	0.8395	0.8441	0.8845	0.8407	0.8455	
		13	0.8134	0.8330	0.8376	0.8734	0.8510	0.8555	
		14	0.8077	0.8287	0.8334	0.8694	0.8564	0.8609	
		15	0.8009	0.8242	0.8286	0.8446	0.8361	0.8407	
		16	0.7970	0.8225	0.8273	0.8506	0.8269	0.8318	
		17	0.7937	0.8211	0.8261	0.9025	0.8210	0.8263	
		18	0.7922	0.8197	0.8248	0.9286	0.8191	0.8245	
		19	0.7908	0.8223	0.8272	0.8691	0.8168	0.8223	
		20	0.7803	0.8239	0.8283	0.8038	0.8147	0.8200	
	Taft	1	0.7928	0.7940	0.7973	0.7792	0.8128	0.8152	0.7961 0.7961 0.7995
		2	0.7925	0.7946	0.7979	0.7567	0.7926	0.7951	
		3	0.7922	0.7950	0.7984	0.7589	0.7897	0.7920	
		4	0.7921	0.7953	0.7987	0.7661	0.7917	0.7938	
		5	0.7917	0.7953	0.7988	0.7671	0.7953	0.7970	
		6	0.7908	0.7952	0.7986	0.7760	0.8004	0.8021	
		7	0.7898	0.7951	0.7986	0.7855	0.8055	0.8072	
		8	0.7879	0.7949	0.7982	0.7952	0.7989	0.8015	
		9	0.7870	0.7953	0.7987	0.7948	0.7954	0.7982	
		10	0.7857	0.7957	0.7991	0.8070	0.7917	0.7948	
		11	0.7846	0.7962	0.7996	0.8294	0.7905	0.7938	
		12	0.7834	0.7964	0.7998	0.8113	0.7904	0.7939	
		13	0.7804	0.7966	0.7998	0.7985	0.7913	0.7950	
		14	0.7778	0.7966	0.7998	0.7957	0.7944	0.7981	
		15	0.7737	0.7962	0.7992	0.8051	0.7970	0.8003	
		16	0.7704	0.7963	0.7994	0.8255	0.7980	0.8011	
		17	0.7670	0.7964	0.7994	0.8889	0.7977	0.8008	
		18	0.7668	0.7965	0.7995	0.9281	0.7977	0.8009	
		19	0.7632	0.7963	0.7994	0.8671	0.7976	0.8006	
		20	0.7479	0.7961	0.7991	0.7906	0.7970	0.7999	
	Kobe	1	0.8365	0.8120	0.8167	0.7670	0.7909	0.7989	0.8396 0.8148 0.8198
		2	0.8380	0.8146	0.8195	0.7380	0.7646	0.7714	
		3	0.8400	0.8174	0.8224	0.7337	0.7581	0.7649	
		4	0.8414	0.8194	0.8245	0.7386	0.7593	0.7656	
		5	0.8420	0.8207	0.8259	0.7468	0.7641	0.7697	
		6	0.8411	0.8213	0.8265	0.7673	0.7744	0.7801	
		7	0.8401	0.8215	0.8267	0.7884	0.7874	0.7925	
		8	0.8381	0.8214	0.8262	0.8050	0.7921	0.7984	
		9	0.8375	0.8219	0.8270	0.8051	0.7864	0.7930	
		10	0.8368	0.8223	0.8276	0.8285	0.7817	0.7886	
		11	0.8362	0.8222	0.8277	0.8718	0.7808	0.7880	
		12	0.8342	0.8217	0.8271	0.8451	0.7826	0.7900	
		13	0.8278	0.8195	0.8248	0.8246	0.7916	0.7990	
		14	0.8228	0.8168	0.8221	0.8324	0.8061	0.8132	
		15	0.8149	0.8132	0.8182	0.8602	0.8217	0.8277	
		16	0.8095	0.8112	0.8166	0.8725	0.8170	0.8231	
		17	0.8037	0.8093	0.8150	0.9214	0.8112	0.8172	
		18	0.7995	0.8076	0.8135	0.9500	0.8084	0.8145	
		19	0.7993	0.8097	0.8153	0.8835	0.8054	0.8116	
		20	0.7938	0.8109	0.8162	0.8091	0.8022	0.8087	
	Mexico SCT	1	0.9315	0.9354	0.9414	0.9735	0.9625	0.9654	0.9349 0.9376 0.9413
		2	0.9300	0.9352	0.9401	0.9653	0.9608	0.9640	
		3	0.9282	0.9346	0.9391	0.9618	0.9561	0.9593	
		4	0.9266	0.9339	0.9382	0.9606	0.9537	0.9570	
		5	0.9251	0.9332	0.9375	0.9554	0.9521	0.9554	

		6	0.9230	0.9321	0.9366	0.9505	0.9486	0.9520	
		7	0.9215	0.9314	0.9360	0.9471	0.9477	0.9512	
		8	0.9190	0.9305	0.9357	0.9410	0.9380	0.9418	
		9	0.9174	0.9302	0.9350	0.9397	0.9372	0.9410	
		10	0.9152	0.9298	0.9344	0.9403	0.9355	0.9393	
		11	0.9132	0.9294	0.9338	0.9426	0.9349	0.9388	
		12	0.9116	0.9291	0.9335	0.9380	0.9346	0.9384	
		13	0.9085	0.9283	0.9330	0.9336	0.9331	0.9370	
		14	0.9059	0.9278	0.9327	0.9310	0.9329	0.9369	
		15	0.9020	0.9272	0.9327	0.9294	0.9287	0.9327	
		16	0.8994	0.9271	0.9322	0.9590	0.9284	0.9325	
		17	0.9037	0.9271	0.9319	1.0739	0.9278	0.9320	
		18	0.9014	0.9270	0.9316	1.1342	0.9278	0.9319	
		19	0.8977	0.9273	0.9321	1.0600	0.9275	0.9316	
		20	0.8868	0.9274	0.9330	0.9443	0.9270	0.9312	
	Northridge	1	0.7814	0.7609	0.7657	0.7932	0.8106	0.8163	0.7850 0.7633 0.7680
		2	0.7806	0.7613	0.7661	0.7792	0.7849	0.7926	
		3	0.7795	0.7615	0.7662	0.7872	0.7787	0.7858	
		4	0.7786	0.7616	0.7663	0.7938	0.7807	0.7872	
		5	0.7776	0.7614	0.7661	0.7949	0.7849	0.7911	
		6	0.7762	0.7610	0.7657	0.7956	0.7882	0.7942	
		7	0.7751	0.7609	0.7656	0.7932	0.7889	0.7949	
		8	0.7733	0.7607	0.7653	0.7885	0.7703	0.7758	
		9	0.7722	0.7610	0.7657	0.7866	0.7654	0.7706	
		10	0.7710	0.7614	0.7662	0.7904	0.7613	0.7665	
		11	0.7700	0.7618	0.7666	0.7990	0.7605	0.7659	
		12	0.7691	0.7621	0.7669	0.7890	0.7610	0.7664	
		13	0.7668	0.7623	0.7671	0.7831	0.7621	0.7675	
		14	0.7649	0.7625	0.7673	0.7809	0.7639	0.7694	
		15	0.7617	0.7624	0.7672	0.7874	0.7626	0.7678	
		16	0.7613	0.7628	0.7677	0.8291	0.7637	0.7688	
		17	0.7631	0.7631	0.7680	0.9484	0.7641	0.7691	
		18	0.7592	0.7634	0.7684	1.0130	0.7645	0.7695	
		19	0.7543	0.7630	0.7680	0.9280	0.7648	0.7699	
		20	0.7421	0.7626	0.7676	0.7964	0.7647	0.7701	
	El Centro	1	0.8406	0.8273	0.8327	0.8163	0.8085	0.8156	0.8438 0.8300 0.8350
		2	0.8420	0.8301	0.8353	0.7960	0.7881	0.7956	
		3	0.8440	0.8332	0.8383	0.7905	0.7810	0.7886	
		4	0.8459	0.8358	0.8410	0.7907	0.7793	0.7868	
		5	0.8473	0.8376	0.8429	0.7901	0.7794	0.7864	
		6	0.8476	0.8386	0.8438	0.7890	0.7803	0.7870	
		7	0.8469	0.8385	0.8438	0.7895	0.7828	0.7890	
		8	0.8440	0.8371	0.8422	0.8054	0.7927	0.7989	
		9	0.8409	0.8355	0.8409	0.8253	0.8029	0.8088	
		10	0.8360	0.8323	0.8378	0.8609	0.8133	0.8193	
		11	0.8310	0.8284	0.8342	0.9040	0.8209	0.8269	
		12	0.8264	0.8249	0.8308	0.8869	0.8279	0.8339	
		13	0.8175	0.8186	0.8245	0.8753	0.8374	0.8436	
		14	0.8118	0.8145	0.8204	0.8686	0.8421	0.8484	
		15	0.8051	0.8102	0.8158	0.8469	0.8217	0.8277	
		16	0.8012	0.8087	0.8146	0.8581	0.8128	0.8191	
		17	0.7985	0.8074	0.8135	0.9143	0.8072	0.8137	
		18	0.7969	0.8061	0.8124	0.9407	0.8054	0.8120	
		19	0.7957	0.8085	0.8146	0.8795	0.8033	0.8100	

		20	0.7863	0.8101	0.8158	0.8088	0.8014	0.8080			
		1	0.7910	0.7666	0.7709	0.7749	0.7850	0.7917	0.7942	0.7693	0.7737
		2	0.7907	0.7676	0.7719	0.7527	0.7637	0.7708			
		3	0.7904	0.7683	0.7727	0.7533	0.7591	0.7660			
		4	0.7903	0.7687	0.7732	0.7592	0.7604	0.7667			
		5	0.7898	0.7689	0.7733	0.7621	0.7636	0.7691			
		6	0.7888	0.7688	0.7732	0.7721	0.7684	0.7735			
		7	0.7878	0.7688	0.7732	0.7830	0.7739	0.7785			
		8	0.7859	0.7686	0.7729	0.7932	0.7704	0.7751			
		9	0.7848	0.7689	0.7733	0.7928	0.7683	0.7732			
		10	0.7834	0.7692	0.7736	0.8068	0.7654	0.7707			
		11	0.7824	0.7695	0.7740	0.8346	0.7647	0.7702			
		12	0.7811	0.7696	0.7741	0.8154	0.7649	0.7705			
		13	0.7776	0.7695	0.7740	0.7980	0.7660	0.7716			
		14	0.7750	0.7694	0.7738	0.7943	0.7690	0.7742			
		15	0.7705	0.7688	0.7732	0.8044	0.7703	0.7749			
		16	0.7671	0.7689	0.7734	0.8400	0.7707	0.7753			
		17	0.7654	0.7689	0.7735	0.9421	0.7701	0.7748			
		18	0.7656	0.7689	0.7736	0.9918	0.7701	0.7749			
		19	0.7627	0.7689	0.7735	0.9066	0.7699	0.7747			
		20	0.7498	0.7688	0.7733	0.7950	0.7694	0.7742			

Tabla A.15.- Índices (J7 y J8) de desempeño del marco de 20 niveles Semi-Activo

Escala del Registro	Registro	N	J7			J8		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	1	0.5124	1.0000	1.0000	0.0811	0.3358	0.3306
		2	0.6642	0.6027	0.5330	0.1054	0.1218	0.1180
		3	0.7696	0.4547	0.4061	0.1226	0.0918	0.0891
		4	0.8261	0.3137	0.2922	0.1336	0.0631	0.0614
		5	0.8611	0.2797	0.2803	0.1426	0.0564	0.0551
		6	0.9182	0.4289	0.4507	0.1552	0.0832	0.0815
		7	0.9575	0.4719	0.5015	0.1656	0.0871	0.0856
		8	1.0000	1.0000	1.0000	0.1929	0.2000	0.1965
		9	1.0000	0.5325	0.5668	0.2018	0.0907	0.0898
		10	1.0000	0.4323	0.4600	0.2068	0.0722	0.0717
		11	1.0000	0.2656	0.2813	0.2030	0.0440	0.0439
		12	1.0000	0.2388	0.2494	0.2043	0.0396	0.0396
		13	1.0000	0.3884	0.3981	0.2136	0.0639	0.0643
		14	1.0000	0.3848	0.3902	0.2180	0.0637	0.0644
		15	1.0000	0.8559	0.8489	0.2385	0.1422	0.1440
		16	1.0000	0.3587	0.3561	0.2451	0.0584	0.0592
		17	1.0000	0.2250	0.2237	0.2445	0.0359	0.0364
		18	1.0000	0.1022	0.1028	0.2350	0.0161	0.0164
		19	1.0000	0.1116	0.1115	0.2378	0.0177	0.0180
		20	1.0000	0.1159	0.1097	0.2433	0.0175	0.0180
	Mexico SCT	1	0.2788	1.0000	1.0000	0.0507	0.2853	0.2819
		2	0.3648	0.5000	0.4982	0.0663	0.0934	0.0921
		3	0.4290	0.3743	0.3730	0.0778	0.0701	0.0691
		4	0.4700	0.2564	0.2547	0.0857	0.0481	0.0474
		5	0.5059	0.2286	0.2267	0.0928	0.0429	0.0423
		6	0.5589	0.3346	0.3316	0.1029	0.0629	0.0621
		7	0.6131	0.3493	0.3457	0.1135	0.0657	0.0648

		8	0.7408	0.8042	0.7964	0.1377	0.1513	0.1494
		9	0.7969	0.3606	0.3578	0.1485	0.0679	0.0670
		10	0.8430	0.2842	0.2826	0.1569	0.0535	0.0528
		11	0.8694	0.1713	0.1709	0.1618	0.0322	0.0318
		12	0.8949	0.1524	0.1522	0.1664	0.0286	0.0283
		13	0.9303	0.2411	0.2409	0.1737	0.0453	0.0448
		14	0.9694	0.2340	0.2342	0.1807	0.0440	0.0435
		15	1.0000	0.5046	0.5061	0.1953	0.0948	0.0937
		16	1.0000	0.2034	0.2041	0.1995	0.0382	0.0378
		17	1.0000	0.1238	0.1243	0.1805	0.0232	0.0230
		18	1.0000	0.0548	0.0553	0.1570	0.0103	0.0101
		19	1.0000	0.0617	0.0624	0.1588	0.0116	0.0114
		20	1.0000	0.0617	0.0626	0.1639	0.0116	0.0113
	Northridge	1	0.3581	1.0000	1.0000	0.1082	0.4629	0.4562
		2	0.4693	0.5781	0.5643	0.1413	0.1703	0.1672
		3	0.5565	0.4392	0.4283	0.1653	0.1280	0.1258
		4	0.6180	0.3044	0.2970	0.1807	0.0879	0.0865
		5	0.6696	0.2743	0.2676	0.1944	0.0786	0.0774
		6	0.7401	0.4075	0.3972	0.2146	0.1156	0.1140
		7	0.8192	0.4302	0.4187	0.2361	0.1209	0.1195
		8	0.9945	1.0000	0.9775	0.2876	0.2791	0.2762
		9	1.0000	0.4549	0.4433	0.3103	0.1254	0.1242
		10	1.0000	0.3632	0.3549	0.3257	0.0990	0.0981
		11	1.0000	0.2222	0.2171	0.3320	0.0598	0.0592
		12	1.0000	0.1987	0.1945	0.3382	0.0532	0.0527
		13	1.0000	0.3180	0.3114	0.3510	0.0846	0.0837
		14	1.0000	0.3100	0.3035	0.3610	0.0825	0.0816
		15	1.0000	0.6697	0.6548	0.3808	0.1789	0.1770
		16	1.0000	0.2720	0.2654	0.3783	0.0725	0.0717
		17	1.0000	0.1663	0.1622	0.3531	0.0443	0.0438
		18	1.0000	0.0741	0.0725	0.3053	0.0197	0.0195
		19	1.0000	0.0836	0.0811	0.3088	0.0221	0.0218
		20	1.0000	0.0847	0.0810	0.3244	0.0221	0.0217
	El Centro	1	0.4764	1.0000	1.0000	0.1116	0.3957	0.3833
		2	0.6132	0.5941	0.5897	0.1444	0.1471	0.1416
		3	0.7119	0.4360	0.4294	0.1668	0.1098	0.1059
		4	0.7697	0.2896	0.2920	0.1801	0.0750	0.0725
		5	0.8168	0.2570	0.2636	0.1880	0.0669	0.0650
		6	0.8581	0.3810	0.3902	0.1963	0.0985	0.0965
		7	0.9006	0.3999	0.4073	0.2034	0.1034	0.1018
		8	0.9675	0.9239	1.0000	0.2349	0.2409	0.2388
		9	1.0000	0.4154	0.4790	0.2476	0.1093	0.1089
		10	1.0000	0.3441	0.4072	0.2550	0.0879	0.0881
		11	1.0000	0.2161	0.2639	0.2524	0.0542	0.0546
		12	1.0000	0.2004	0.2466	0.2531	0.0493	0.0498
		13	1.0000	0.3501	0.4281	0.2691	0.0817	0.0829
		14	1.0000	0.3639	0.4384	0.2792	0.0820	0.0833
		15	1.0000	0.8307	0.9930	0.3091	0.1835	0.1873
		16	1.0000	0.3435	0.4099	0.3178	0.0754	0.0770
		17	1.0000	0.2120	0.2514	0.3094	0.0466	0.0476
		18	1.0000	0.0949	0.1123	0.2834	0.0211	0.0215
		19	1.0000	0.1015	0.1207	0.2905	0.0230	0.0235
		20	1.0000	0.1008	0.1277	0.3018	0.0226	0.0234
	Taft	1	0.5939	1.0000	1.0000	0.1236	0.4758	0.4707

		2	0.7634	0.8008	0.7798	0.1610	0.2017	0.1973
		3	0.8767	0.6021	0.5868	0.1876	0.1513	0.1481
		4	0.9449	0.4125	0.4015	0.2047	0.1038	0.1018
		5	0.9959	0.3659	0.3558	0.2196	0.0928	0.0912
		6	1.0000	0.5305	0.5164	0.2404	0.1365	0.1344
		7	1.0000	0.5482	0.5335	0.2625	0.1429	0.1410
		8	1.0000	1.0000	1.0000	0.3103	0.3265	0.3240
		9	1.0000	0.5548	0.5425	0.3282	0.1484	0.1470
		10	1.0000	0.4313	0.4269	0.3405	0.1176	0.1166
		11	1.0000	0.2567	0.2578	0.3417	0.0712	0.0707
		12	1.0000	0.2249	0.2302	0.3446	0.0637	0.0632
		13	1.0000	0.3567	0.3665	0.3579	0.1019	0.1014
		14	1.0000	0.3480	0.3575	0.3670	0.0994	0.0991
		15	1.0000	0.7543	0.7766	0.3883	0.2167	0.2163
		16	1.0000	0.3067	0.3150	0.3890	0.0880	0.0879
		17	1.0000	0.1875	0.1929	0.3760	0.0537	0.0536
		18	1.0000	0.0831	0.0853	0.3332	0.0239	0.0239
		19	1.0000	0.0928	0.0956	0.3400	0.0267	0.0266
		20	1.0000	0.0930	0.0979	0.3546	0.0265	0.0264
		0.25 m/s	Kobe	1	0.2510	0.9584	0.8457	0.0395
2	0.3248			0.2989	0.2651	0.0513	0.0601	0.0583
3	0.3738			0.2260	0.2022	0.0598	0.0453	0.0441
4	0.4005			0.1561	0.1450	0.0652	0.0311	0.0304
5	0.4204			0.1394	0.1393	0.0696	0.0279	0.0273
6	0.4460			0.2134	0.2236	0.0757	0.0411	0.0403
7	0.4655			0.2341	0.2487	0.0806	0.0431	0.0424
8	0.5852			0.5696	0.6068	0.0948	0.0996	0.0984
9	0.6304			0.2633	0.2807	0.1004	0.0448	0.0445
10	0.6626			0.2136	0.2278	0.1038	0.0357	0.0355
11	0.6805			0.1313	0.1395	0.1008	0.0217	0.0217
12	0.6861			0.1182	0.1242	0.1016	0.0195	0.0196
13	0.6876			0.1920	0.1982	0.1062	0.0315	0.0319
14	0.6868			0.1896	0.1939	0.1083	0.0314	0.0319
15	0.7047			0.4270	0.4210	0.1219	0.0701	0.0713
16	0.7302			0.1793	0.1779	0.1280	0.0288	0.0293
17	0.7613			0.1122	0.1118	0.1292	0.0177	0.0181
18	0.7801			0.0509	0.0514	0.1224	0.0079	0.0081
19	0.7927			0.0557	0.0556	0.1252	0.0087	0.0089
20	0.7973			0.0579	0.0548	0.1283	0.0086	0.0089
Mexico SCT	1		0.1377	0.8001	0.7998	0.0251	0.1505	0.1483
	2		0.1803	0.2475	0.2470	0.0328	0.0466	0.0459
	3		0.2113	0.1854	0.1850	0.0385	0.0350	0.0345
	4		0.2325	0.1270	0.1265	0.0424	0.0240	0.0237
	5		0.2503	0.1133	0.1127	0.0459	0.0214	0.0211
	6		0.2766	0.1661	0.1648	0.0509	0.0314	0.0310
	7		0.3032	0.1733	0.1719	0.0562	0.0328	0.0324
	8		0.3660	0.3990	0.3959	0.0682	0.0755	0.0745
	9		0.3946	0.1788	0.1777	0.0735	0.0338	0.0334
	10		0.4164	0.1409	0.1404	0.0777	0.0267	0.0264
	11		0.4298	0.0849	0.0849	0.0802	0.0161	0.0159
	12		0.4407	0.0755	0.0756	0.0824	0.0143	0.0141
	13		0.4594	0.1196	0.1200	0.0860	0.0226	0.0223
	14		0.4786	0.1162	0.1167	0.0894	0.0219	0.0217
	15		0.5198	0.2510	0.2526	0.0968	0.0473	0.0468

		16	0.5383	0.1014	0.1020	0.0991	0.0191	0.0189
		17	0.5551	0.0617	0.0621	0.0897	0.0116	0.0115
		18	0.5626	0.0273	0.0276	0.0777	0.0051	0.0051
		19	0.5644	0.0307	0.0312	0.0786	0.0058	0.0057
		20	0.5608	0.0307	0.0312	0.0806	0.0058	0.0057
	Northridge	1	0.1734	0.9138	0.8943	0.0510	0.2682	0.2637
		2	0.2255	0.2856	0.2795	0.0666	0.0832	0.0818
		3	0.2659	0.2172	0.2125	0.0779	0.0625	0.0615
		4	0.2936	0.1508	0.1476	0.0853	0.0430	0.0423
		5	0.3190	0.1361	0.1330	0.0917	0.0384	0.0379
		6	0.3520	0.2024	0.1977	0.1012	0.0565	0.0558
		7	0.3884	0.2139	0.2086	0.1114	0.0591	0.0584
		8	0.4699	0.4997	0.4872	0.1357	0.1364	0.1351
		9	0.5096	0.2264	0.2210	0.1468	0.0613	0.0607
		10	0.5404	0.1812	0.1770	0.1552	0.0484	0.0480
		11	0.5593	0.1110	0.1085	0.1593	0.0292	0.0290
		12	0.5752	0.0994	0.0972	0.1631	0.0260	0.0258
		13	0.6017	0.1592	0.1559	0.1707	0.0413	0.0410
		14	0.6272	0.1556	0.1524	0.1775	0.0403	0.0399
		15	0.6922	0.3370	0.3301	0.1931	0.0875	0.0867
		16	0.7215	0.1369	0.1339	0.1948	0.0355	0.0351
		17	0.7436	0.0838	0.0820	0.1811	0.0217	0.0215
		18	0.7551	0.0374	0.0365	0.1576	0.0096	0.0095
		19	0.7607	0.0419	0.0408	0.1601	0.0108	0.0107
		20	0.7619	0.0425	0.0409	0.1637	0.0108	0.0106
	El Centro	1	0.2261	0.9650	0.9628	0.0539	0.2345	0.2258
		2	0.2944	0.2941	0.2928	0.0697	0.0723	0.0697
		3	0.3397	0.2162	0.2135	0.0805	0.0540	0.0521
		4	0.3702	0.1436	0.1423	0.0869	0.0369	0.0357
		5	0.3944	0.1254	0.1284	0.0906	0.0329	0.0320
		6	0.4160	0.1878	0.1927	0.0951	0.0484	0.0475
		7	0.4338	0.1967	0.2004	0.0982	0.0508	0.0501
		8	0.4677	0.4548	0.5029	0.1131	0.1184	0.1176
		9	0.4899	0.2089	0.2399	0.1192	0.0537	0.0536
		10	0.5204	0.1729	0.2038	0.1233	0.0432	0.0434
		11	0.5403	0.1085	0.1321	0.1221	0.0267	0.0269
		12	0.5513	0.1006	0.1234	0.1224	0.0243	0.0245
		13	0.5628	0.1750	0.2142	0.1303	0.0402	0.0409
		14	0.5745	0.1822	0.2193	0.1366	0.0403	0.0411
		15	0.6016	0.4157	0.4967	0.1541	0.0904	0.0924
		16	0.6507	0.1719	0.2050	0.1590	0.0371	0.0380
		17	0.6953	0.1061	0.1257	0.1549	0.0229	0.0235
		18	0.7112	0.0474	0.0562	0.1429	0.0104	0.0106
		19	0.7159	0.0511	0.0604	0.1471	0.0113	0.0116
		20	0.7264	0.0507	0.0638	0.1534	0.0111	0.0115
	Taft	1	0.2895	1.0000	1.0000	0.0597	0.3079	0.3036
		2	0.3744	0.3894	0.3781	0.0779	0.0975	0.0955
		3	0.4284	0.2934	0.2848	0.0908	0.0732	0.0717
		4	0.4604	0.2004	0.1953	0.0991	0.0502	0.0493
		5	0.4844	0.1777	0.1737	0.1063	0.0449	0.0441
		6	0.5122	0.2586	0.2522	0.1167	0.0660	0.0651
		7	0.5360	0.2681	0.2612	0.1275	0.0691	0.0683
		8	0.5941	0.6120	0.6004	0.1536	0.1597	0.1581
		9	0.6311	0.2722	0.2681	0.1651	0.0718	0.0712

		10	0.6610	0.2125	0.2124	0.1737	0.0568	0.0564
		11	0.6801	0.1267	0.1290	0.1749	0.0344	0.0342
		12	0.6900	0.1113	0.1159	0.1766	0.0308	0.0306
		13	0.7191	0.1786	0.1852	0.1872	0.0492	0.0491
		14	0.7569	0.1749	0.1817	0.1943	0.0480	0.0480
		15	0.8390	0.3815	0.3959	0.2112	0.1047	0.1047
		16	0.8772	0.1554	0.1610	0.2136	0.0425	0.0425
		17	0.9129	0.0952	0.0984	0.1989	0.0259	0.0259
		18	0.9237	0.0422	0.0438	0.1779	0.0115	0.0115
		19	0.9257	0.0469	0.0491	0.1810	0.0129	0.0129
		20	0.9240	0.0467	0.0495	0.1879	0.0127	0.0128

Tabla A.16.- Índices (J1, J2 y J3) de desempeño del marco de 20 niveles Activo

Escala del Registro	Registro	N	J1			J2			J3		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	1	0.9104	0.9126	0.9147	1.1889	1.2056	0.9760	0.9213	0.9159	0.9187
		2	0.9222	0.9197	0.9257	1.0210	0.9054	1.0051			
		3	0.9291	0.9327	0.9418	0.9446	0.8078	0.9119			
		4	0.9387	0.9522	0.9590	0.9840	0.8348	0.8506			
		5	0.9537	0.9595	0.9658	0.9479	0.8862	0.8724			
		6	0.9580	0.9620	0.9687	1.0740	0.9708	0.9472			
		7	0.9599	0.9632	0.9709	1.2119	0.9597	0.9529			
		8	0.9646	0.9606	0.9664	1.0351	0.8128	0.8010			
		9	0.9730	0.9665	0.9731	1.0582	0.8181	0.8063			
		10	0.9955	0.9735	0.9802	1.2394	0.8533	0.8623			
		11	0.9810	0.9214	0.9250	1.7941	0.9130	0.8783			
		12	0.9312	0.9248	0.9298	1.4885	0.9016	0.8941			
		13	0.8846	0.9273	0.9308	1.4713	0.9068	0.9222			
		14	0.8598	0.9278	0.9291	1.2364	0.8972	0.8990			
		15	0.8687	0.9309	0.9282	1.7313	0.9386	0.9552			
		16	0.8699	0.9297	0.9278	1.7383	0.9158	0.9270			
		17	0.8934	0.9298	0.9269	1.9309	0.9311	0.9363			
		18	0.9015	0.9286	0.9279	1.7050	0.9315	0.9261			
		19	0.9541	0.9294	0.9298	1.5903	0.9230	0.9399			
		20	0.9412	0.9338	0.9212	1.0616	0.9417	0.9145			
	Mexico SCT	1	0.9920	1.0137	1.0206	1.1447	0.9808	0.9898	0.9946	1.0147	1.0187
		2	0.9926	1.0146	1.0197	1.1845	0.9907	1.0058			
		3	0.9915	1.0155	1.0195	1.2964	1.0041	1.0119			
		4	0.9916	1.0157	1.0192	1.3792	1.0028	1.0161			
		5	0.9898	1.0155	1.0187	1.3258	1.0084	1.0164			
		6	0.9862	1.0149	1.0181	1.3859	1.0143	1.0195			
		7	0.9870	1.0147	1.0175	1.4281	1.0216	1.0285			
		8	0.9826	1.0138	1.0175	1.4489	1.0197	1.0225			
		9	0.9804	1.0142	1.0169	1.5057	1.0195	1.0211			
		10	0.9781	1.0147	1.0168	1.4085	1.0094	1.0157			
		11	0.9856	1.0163	1.0170	1.5217	1.0088	1.0090			
		12	0.9881	1.0174	1.0177	1.5220	1.0083	1.0108			
		13	0.9702	1.0181	1.0190	1.3942	1.0018	1.0050			
		14	0.9858	1.0181	1.0199	1.6342	1.0032	1.0089			
		15	0.9667	1.0164	1.0205	1.7916	1.0170	1.0241			
		16	0.9848	1.0166	1.0201	2.0438	1.0208	1.0204			
		17	1.0170	1.0165	1.0199	2.4859	1.0218	1.0225			

		18	1.1224	1.0163	1.0201	2.6988	1.0206	1.0237			
		19	1.0584	1.0154	1.0197	2.0916	1.0178	1.0232			
		20	0.9857	1.0151	1.0200	1.2810	1.0194	1.0219			
	Northridge	1	0.9290	0.9091	0.9143	1.0154	0.9918	0.9835	0.9325	0.9106	0.9161
		2	0.9289	0.9144	0.9196	0.9581	0.8896	0.9116			
		3	0.9330	0.9226	0.9279	1.0563	0.8944	0.9123			
		4	0.9333	0.9300	0.9353	1.0169	0.9083	0.9207			
		5	0.9354	0.9345	0.9399	0.9539	0.8882	0.8876			
		6	0.9376	0.9395	0.9447	0.8679	0.8482	0.8626			
		7	0.9383	0.9435	0.9487	0.9738	0.9181	0.9447			
		8	0.9392	0.9486	0.9529	1.4553	0.9249	0.9370			
		9	0.9517	0.9528	0.9566	1.5293	0.8534	0.8789			
		10	0.9559	0.9532	0.9566	1.5575	0.7963	0.8187			
		11	0.9472	0.9477	0.9511	1.5491	0.7953	0.8065			
		12	0.9528	0.9375	0.9408	1.7815	0.8520	0.8573			
		13	0.9329	0.9209	0.9241	1.7512	0.9501	0.9556			
		14	0.9244	0.9170	0.9200	1.8085	0.9208	0.9363			
		15	0.9015	0.9197	0.9221	1.8673	0.9615	0.9541			
		16	0.9224	0.9184	0.9214	2.1175	0.9379	0.9374			
		17	0.9388	0.9181	0.9214	2.5418	0.9198	0.9067			
		18	1.0420	0.9172	0.9202	2.6493	0.9161	0.9154			
		19	1.0421	0.9144	0.9171	2.2704	0.9248	0.9216			
		20	0.9569	0.9089	0.9118	1.1957	0.8317	0.8460			
	El Centro	1	0.8928	0.8892	0.8925	1.1799	0.8836	0.8960	0.8891	0.8942	0.8990
		2	0.9031	0.9108	0.9133	1.2341	0.8628	0.8658			
		3	0.9030	0.9137	0.9141	1.0761	0.8416	0.8285			
		4	0.9094	0.9128	0.9149	0.9182	0.8102	0.8049			
		5	0.9045	0.8957	0.8978	1.0644	0.8047	0.8101			
		6	0.8905	0.8704	0.8740	0.9925	0.7747	0.8298			
		7	0.8742	0.8643	0.8651	0.8802	0.7968	0.7949			
		8	0.8632	0.8520	0.8549	0.9818	0.9154	0.9459			
		9	0.8782	0.8558	0.8597	1.0829	0.9043	0.8706			
		10	0.8746	0.8585	0.8617	1.9373	0.9138	0.9221			
		11	0.8748	0.8527	0.8545	2.3757	0.9209	0.9457			
		12	0.8562	0.8461	0.8487	2.5327	0.9341	0.9582			
		13	0.8570	0.8396	0.8414	1.9818	0.9306	0.9039			
		14	0.8634	0.8390	0.8420	1.5011	0.8917	0.9009			
		15	0.8658	0.8542	0.8573	1.1498	0.8636	0.8520			
		16	0.8952	0.8787	0.8822	1.2504	0.8694	0.8665			
		17	0.9181	0.8989	0.9028	1.3841	0.9002	0.8912			
		18	0.9148	0.9167	0.9193	1.5436	0.9177	0.9197			
		19	0.9540	0.8943	0.8971	1.4403	0.9381	0.9393			
		20	0.8878	0.8745	0.8789	0.9784	0.9266	0.9303			
	Taft	1	0.8761	0.8587	0.8627	1.0514	0.8960	0.8661	0.8796	0.8570	0.8616
		2	0.8761	0.8595	0.8637	1.0262	0.8943	0.8562			
		3	0.8752	0.8637	0.8670	0.9832	0.9002	0.8872			
		4	0.8667	0.8637	0.8666	1.1352	0.9214	0.9012			
		5	0.8614	0.8618	0.8647	1.0807	0.8607	0.8618			
		6	0.8585	0.8585	0.8632	1.1037	0.8654	0.8839			
		7	0.8609	0.8585	0.8626	1.0163	0.8515	0.8657			
		8	0.8579	0.8569	0.8597	1.0607	0.9328	0.8855			
		9	0.8596	0.8590	0.8614	1.3194	0.9183	0.9084			
		10	0.8611	0.8616	0.8640	1.4340	0.9151	0.8951			
		11	0.8687	0.8639	0.8669	2.0691	0.9273	0.9058			

		12	0.8752	0.8650	0.8677	1.8209	0.9157	0.8999			
		13	0.8622	0.8788	0.8784	1.4379	0.8899	0.8943			
		14	0.8586	0.8782	0.8779	1.1815	0.8439	0.8495			
		15	0.8428	0.8774	0.8776	1.3020	0.8743	0.8768			
		16	0.8246	0.8744	0.8747	1.4192	0.9207	0.9019			
		17	0.8150	0.8761	0.8756	1.7020	0.8874	0.8765			
		18	0.8483	0.8734	0.8698	1.7802	0.9148	0.8928			
		19	0.8398	0.8781	0.8762	1.3351	0.8762	0.8756			
		20	0.8302	0.8774	0.8757	0.9503	0.8612	0.8573			
0.25 m/s	Kobe	1	0.9329	0.9073	0.9100	1.1541	1.4556	1.6087	0.9351	0.9045	0.9132
		2	0.9365	0.9149	0.9204	0.9394	1.0433	0.9919			
		3	0.9471	0.9272	0.9344	0.9922	0.9214	0.9756			
		4	0.9639	0.9406	0.9516	1.0015	0.9140	0.9253			
		5	0.9690	0.9492	0.9609	1.0094	0.9653	1.0064			
		6	0.9662	0.9573	0.9669	1.1593	0.9250	0.9202			
		7	0.9711	0.9606	0.9707	1.4273	0.9439	0.9392			
		8	0.9626	0.9603	0.9682	1.0796	0.8763	0.8695			
		9	0.9824	0.9665	0.9764	1.0323	0.8442	0.8123			
		10	0.9915	0.9744	0.9855	1.2345	0.8520	0.8489			
		11	0.9304	0.9139	0.9238	1.2228	0.8718	0.8772			
		12	0.9021	0.9141	0.9181	1.2322	0.9095	0.8884			
		13	0.9170	0.9128	0.9179	1.5385	0.9710	0.8999			
		14	0.9134	0.9086	0.9164	1.4695	0.9115	0.8956			
		15	0.9082	0.9065	0.9149	1.7243	0.9446	0.9466			
		16	0.9058	0.9038	0.9126	1.6763	0.9470	0.9196			
		17	0.9304	0.9003	0.9117	1.3820	0.9210	0.9226			
		18	0.9759	0.8985	0.9103	1.4384	0.9125	0.9173			
		19	0.9795	0.9036	0.9107	1.5361	0.9218	0.9189			
		20	0.9731	0.8923	0.9021	1.1840	0.8789	0.8939			
	Mexico SCT	1	0.9897	1.0096	1.0162	1.3492	0.9904	0.9967	0.9939	1.0116	1.0152
		2	0.9890	1.0103	1.0155	1.1501	0.9982	1.0060			
		3	0.9865	1.0108	1.0153	1.1987	0.9997	1.0084			
		4	0.9842	1.0107	1.0149	1.2810	1.0005	1.0169			
		5	0.9825	1.0100	1.0142	1.2638	1.0023	1.0106			
		6	0.9807	1.0086	1.0133	1.2627	1.0044	1.0161			
		7	0.9794	1.0078	1.0126	1.2561	1.0118	1.0311			
		8	0.9786	1.0065	1.0122	1.4758	1.0087	1.0534			
		9	0.9846	1.0066	1.0117	1.4846	1.0138	1.0263			
		10	0.9795	1.0068	1.0118	1.4772	1.0087	1.0166			
		11	0.9949	1.0075	1.0123	1.5200	1.0066	1.0131			
		12	0.9903	1.0081	1.0130	1.5550	1.0040	1.0088			
		13	0.9976	1.0084	1.0136	1.4818	0.9932	0.9965			
		14	0.9982	1.0082	1.0137	1.5075	0.9956	0.9991			
		15	0.9713	1.0065	1.0132	1.5748	1.0059	1.0111			
		16	0.9866	1.0067	1.0126	1.7162	1.0092	1.0144			
		17	0.9686	1.0067	1.0125	1.7257	1.0106	1.0160			
		18	1.0061	1.0069	1.0124	1.9360	1.0108	1.0154			
		19	0.9668	1.0064	1.0123	2.0468	1.0103	1.0146			
		20	0.9675	1.0062	1.0129	1.2740	1.0104	1.0151			
	Northridge	1	0.9249	0.9067	0.9124	0.9885	0.9918	0.9835	0.9301	0.9079	0.9137
		2	0.9319	0.9106	0.9167	1.0672	0.8896	0.9116			
		3	0.9339	0.9174	0.9238	1.1523	0.8944	0.9123			
		4	0.9357	0.9233	0.9294	1.0222	0.9083	0.9207			
		5	0.9393	0.9264	0.9325	0.8773	0.8882	0.8876			

		6	0.9406	0.9290	0.9356	0.8566	0.8482	0.8626	
		7	0.9429	0.9309	0.9371	0.9431	0.9181	0.9447	
		8	0.9387	0.9327	0.9382	1.6264	0.9288	0.9340	
		9	0.9488	0.9345	0.9396	1.4508	0.8534	0.8789	
		10	0.9561	0.9321	0.9369	1.4583	0.7963	0.8187	
		11	0.9591	0.9249	0.9295	1.6041	0.7953	0.8065	
		12	0.9373	0.9141	0.9186	1.6192	0.8478	0.8488	
		13	0.9114	0.8961	0.9005	1.4159	0.9501	0.9556	
		14	0.9128	0.8826	0.8873	1.3089	0.9208	0.9363	
		15	0.8769	0.8825	0.8862	1.8628	0.9292	0.9804	
		16	0.8916	0.8794	0.8842	1.8811	0.9161	0.9160	
		17	0.8740	0.8778	0.8826	2.3365	0.8729	0.8786	
		18	0.9278	0.8757	0.8805	2.3438	0.8714	0.8779	
		19	0.9377	0.8748	0.8795	2.5241	0.8750	0.8787	
		20	0.9149	0.8724	0.8757	1.1628	0.8317	0.8460	
	El Centro	1	0.9192	0.8763	0.8816	0.9886	0.8813	0.8971	0.9152 0.8795 0.8861
		2	0.9330	0.8938	0.9011	1.0161	0.8499	0.8574	
		3	0.9299	0.8907	0.8994	1.0070	0.8272	0.8280	
		4	0.9248	0.8896	0.8978	0.9586	0.7892	0.8103	
		5	0.9019	0.8722	0.8804	0.9161	0.8145	0.8161	
		6	0.8731	0.8502	0.8556	0.9154	0.7867	0.7984	
		7	0.8669	0.8452	0.8509	0.8607	0.7719	0.7926	
		8	0.8578	0.8439	0.8486	1.4147	0.9059	0.9029	
		9	0.8680	0.8484	0.8536	1.0850	0.8869	0.8917	
		10	0.8708	0.8429	0.8490	1.3823	0.9064	0.9188	
		11	0.8592	0.8250	0.8324	1.8207	0.9408	0.9446	
		12	0.8509	0.8163	0.8233	1.6941	0.9425	0.9232	
		13	0.8519	0.8168	0.8251	1.4367	0.8928	0.9084	
		14	0.8615	0.8228	0.8313	1.3105	0.8937	0.8940	
		15	0.8602	0.8511	0.8647	1.3548	0.8286	0.8355	
		16	0.8961	0.8767	0.8904	1.2366	0.8515	0.8552	
		17	0.8998	0.8980	0.9102	1.3348	0.8936	0.8993	
		18	0.9161	0.9153	0.9264	1.5958	0.9158	0.9270	
		19	0.8766	0.8922	0.9022	1.2496	0.9362	0.9449	
		20	0.8571	0.8729	0.8841	0.9640	0.9254	0.9366	
	Taft	1	0.8499	0.8516	0.8565	0.9999	0.8087	0.8434	0.8598 0.8521 0.8574
		2	0.8524	0.8494	0.8538	0.9653	0.8363	0.8419	
		3	0.8599	0.8481	0.8520	1.0886	0.8420	0.8809	
		4	0.8603	0.8446	0.8488	0.9845	0.8256	0.8688	
		5	0.8552	0.8390	0.8429	1.0094	0.8346	0.8618	
		6	0.8520	0.8316	0.8372	1.0028	0.8453	0.8839	
		7	0.8500	0.8283	0.8341	0.9959	0.8530	0.8273	
		8	0.8518	0.8254	0.8317	1.2086	0.8396	0.8465	
		9	0.8575	0.8289	0.8348	1.0942	0.8635	0.8595	
		10	0.8516	0.8329	0.8382	1.2449	0.8829	0.8757	
		11	0.8544	0.8361	0.8405	1.5574	0.8833	0.8831	
		12	0.8493	0.8356	0.8387	1.2524	0.8644	0.8835	
		13	0.8598	0.8483	0.8541	1.2171	0.9027	0.8850	
		14	0.8522	0.8468	0.8519	1.1864	0.8271	0.8313	
		15	0.8490	0.8429	0.8483	1.3268	0.8483	0.8451	
		16	0.8499	0.8419	0.8474	1.3588	0.8634	0.8645	
		17	0.8754	0.8388	0.8463	1.4118	0.8464	0.8579	
		18	0.9305	0.8356	0.8419	1.4240	0.8404	0.8446	
		19	0.8650	0.8382	0.8444	1.2980	0.8376	0.8379	

		20	0.8596	0.8390	0.8463	0.8843	0.8178	0.8245	
--	--	-----------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--

Tabla A.17.- Índices (J4, J5 y J6) de desempeño del marco de 20 niveles Activo

Escala del Registro	Registro	N	J4			J5			J6		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	1	0.8325	0.8227	0.8261	0.8504	0.8342	0.8355	0.8362	0.8250	0.8290
		2	0.8333	0.8244	0.8282	0.8104	0.8059	0.8094			
		3	0.8344	0.8264	0.8304	0.7991	0.7985	0.8018			
		4	0.8353	0.8280	0.8322	0.7955	0.7981	0.8009			
		5	0.8357	0.8291	0.8334	0.8047	0.8006	0.8034			
		6	0.8351	0.8298	0.8340	0.8258	0.8070	0.8101			
		7	0.8345	0.8302	0.8344	0.8411	0.8143	0.8179			
		8	0.8325	0.8303	0.8340	0.8788	0.8172	0.8220			
		9	0.8320	0.8309	0.8350	0.8984	0.8153	0.8195			
		10	0.8314	0.8314	0.8356	0.9485	0.8122	0.8158			
		11	0.8313	0.8317	0.8361	1.0092	0.8115	0.8153			
		12	0.8308	0.8316	0.8359	0.9467	0.8122	0.8166			
		13	0.8268	0.8306	0.8345	0.9224	0.8168	0.8216			
		14	0.8233	0.8294	0.8332	0.8933	0.8250	0.8304			
		15	0.8185	0.8275	0.8308	0.9227	0.8328	0.8381			
		16	0.8157	0.8268	0.8303	0.9534	0.8311	0.8358			
		17	0.8121	0.8261	0.8297	1.0135	0.8276	0.8320			
		18	0.8101	0.8255	0.8293	1.0361	0.8264	0.8306			
		19	0.8114	0.8264	0.8301	0.9615	0.8251	0.8291			
		20	0.8092	0.8269	0.8304	0.8470	0.8242	0.8285			
	Mexico SCT	1	0.9286	0.9370	0.9428	1.0099	0.9642	0.9669	0.9324	0.9391	0.9427
		2	0.9270	0.9368	0.9416	0.9862	0.9620	0.9649			
		3	0.9250	0.9362	0.9406	0.9823	0.9573	0.9604			
		4	0.9234	0.9355	0.9397	0.9741	0.9550	0.9581			
		5	0.9218	0.9348	0.9390	0.9714	0.9535	0.9566			
		6	0.9195	0.9337	0.9382	0.9640	0.9500	0.9533			
		7	0.9178	0.9331	0.9376	0.9624	0.9492	0.9525			
		8	0.9149	0.9321	0.9373	0.9586	0.9395	0.9431			
		9	0.9132	0.9319	0.9366	0.9568	0.9388	0.9425			
		10	0.9109	0.9315	0.9360	0.9607	0.9370	0.9408			
		11	0.9089	0.9311	0.9354	0.9681	0.9365	0.9402			
		12	0.9072	0.9308	0.9352	0.9565	0.9361	0.9399			
		13	0.9037	0.9300	0.9347	0.9485	0.9347	0.9385			
		14	0.9009	0.9296	0.9343	0.9424	0.9346	0.9384			
		15	0.8961	0.9290	0.9344	0.9708	0.9304	0.9343			
		16	0.8943	0.9289	0.9339	1.0287	0.9302	0.9341			
		17	0.8888	0.9289	0.9336	1.1298	0.9296	0.9336			
		18	0.8844	0.9288	0.9333	1.1512	0.9296	0.9336			
		19	0.8781	0.9291	0.9338	1.0511	0.9293	0.9333			
		20	0.8598	0.9292	0.9347	0.9506	0.9288	0.9329			
	Northridge	1	0.7794	0.7785	0.7825	0.9147	0.8281	0.8361	0.7836	0.7807	0.7846
		2	0.7782	0.7788	0.7828	0.8711	0.8015	0.8115			
		3	0.7768	0.7790	0.7829	0.8719	0.7936	0.8029			
		4	0.7758	0.7790	0.7830	0.8633	0.7950	0.8034			
		5	0.7748	0.7789	0.7828	0.8602	0.7989	0.8062			
		6	0.7733	0.7786	0.7825	0.8477	0.8017	0.8087			
		7	0.7723	0.7785	0.7824	0.8406	0.8031	0.8096			

		8	0.7702	0.7782	0.7821	0.8425	0.7863	0.7915			
		9	0.7689	0.7785	0.7824	0.8470	0.7830	0.7881			
		10	0.7676	0.7787	0.7827	0.8635	0.7798	0.7853			
		11	0.7664	0.7790	0.7830	0.8792	0.7794	0.7851			
		12	0.7656	0.7791	0.7831	0.8500	0.7801	0.7859			
		13	0.7637	0.7791	0.7831	0.8288	0.7812	0.7867			
		14	0.7626	0.7791	0.7832	0.8172	0.7829	0.7881			
		15	0.7607	0.7790	0.7831	0.8483	0.7802	0.7844			
		16	0.7606	0.7792	0.7835	0.9518	0.7807	0.7848			
		17	0.7637	0.7795	0.7838	1.2093	0.7805	0.7848			
		18	0.7702	0.7799	0.7843	1.2648	0.7808	0.7852			
		19	0.7630	0.7797	0.7840	1.0627	0.7811	0.7857			
		20	0.7504	0.7795	0.7837	0.8439	0.7818	0.7865			
	El Centro	1	0.8425	0.8407	0.8452	0.8942	0.8346	0.8441	0.8468	0.8434	0.8478
		2	0.8423	0.8430	0.8474	0.8726	0.8139	0.8234			
		3	0.8422	0.8456	0.8499	0.8676	0.8069	0.8158			
		4	0.8424	0.8477	0.8521	0.8637	0.8049	0.8133			
		5	0.8424	0.8493	0.8536	0.8609	0.8049	0.8132			
		6	0.8419	0.8502	0.8545	0.8577	0.8052	0.8139			
		7	0.8413	0.8502	0.8546	0.8553	0.8069	0.8148			
		8	0.8392	0.8492	0.8533	0.8767	0.8146	0.8214			
		9	0.8377	0.8480	0.8525	0.9006	0.8227	0.8289			
		10	0.8357	0.8454	0.8503	0.9868	0.8314	0.8377			
		11	0.8348	0.8423	0.8476	1.0891	0.8376	0.8438			
		12	0.8332	0.8395	0.8450	1.0333	0.8437	0.8494			
		13	0.8293	0.8345	0.8402	0.9890	0.8523	0.8568			
		14	0.8275	0.8312	0.8371	0.9486	0.8566	0.8610			
		15	0.8241	0.8279	0.8335	0.9289	0.8380	0.8437			
		16	0.8224	0.8266	0.8328	0.9735	0.8303	0.8367			
		17	0.8221	0.8257	0.8321	1.0841	0.8255	0.8323			
		18	0.8249	0.8248	0.8314	1.1145	0.8242	0.8312			
		19	0.8211	0.8267	0.8330	0.9811	0.8229	0.8302			
		20	0.8141	0.8280	0.8337	0.8601	0.8215	0.8286			
	Taft	1	0.7978	0.7923	0.7956	0.9072	0.8299	0.8344	0.8017	0.7943	0.7975
		2	0.7968	0.7926	0.7958	0.8644	0.8109	0.8155			
		3	0.7957	0.7929	0.7961	0.8582	0.8068	0.8109			
		4	0.7948	0.7930	0.7962	0.8527	0.8073	0.8111			
		5	0.7939	0.7930	0.7962	0.8562	0.8093	0.8129			
		6	0.7926	0.7929	0.7961	0.8603	0.8115	0.8154			
		7	0.7918	0.7930	0.7961	0.8601	0.8136	0.8172			
		8	0.7901	0.7929	0.7959	0.8636	0.8033	0.8073			
		9	0.7896	0.7933	0.7965	0.8752	0.8001	0.8038			
		10	0.7893	0.7938	0.7971	0.9336	0.7966	0.8002			
		11	0.7900	0.7945	0.7978	1.0341	0.7952	0.7989			
		12	0.7902	0.7950	0.7983	0.9612	0.7947	0.7983			
		13	0.7888	0.7957	0.7990	0.8912	0.7940	0.7977			
		14	0.7883	0.7963	0.7996	0.8563	0.7953	0.7988			
		15	0.7866	0.7966	0.7999	0.8767	0.7960	0.7993			
		16	0.7853	0.7971	0.8005	0.9602	0.7980	0.8014			
		17	0.7872	0.7975	0.8009	1.1385	0.7987	0.8021			
		18	0.7944	0.7980	0.8015	1.1893	0.7993	0.8029			
		19	0.7891	0.7974	0.8008	1.0231	0.7999	0.8034			
		20	0.7775	0.7970	0.8002	0.8518	0.8002	0.8037			
	Kobe	1	0.8326	0.8091	0.8144	0.9041	0.8155	0.8290	0.8367	0.8124	0.8180

0.25 m/s		2	0.8325	0.8114	0.8168	0.8739	0.7905	0.8026	
		3	0.8326	0.8138	0.8193	0.8635	0.7842	0.7956	
		4	0.8328	0.8156	0.8212	0.8599	0.7840	0.7940	
		5	0.8328	0.8168	0.8224	0.8637	0.7867	0.7970	
		6	0.8329	0.8176	0.8232	0.8748	0.7934	0.8029	
		7	0.8327	0.8181	0.8238	0.8792	0.8012	0.8100	
		8	0.8315	0.8183	0.8235	0.9141	0.8039	0.8121	
		9	0.8311	0.8190	0.8247	0.9146	0.8016	0.8088	
		10	0.8306	0.8197	0.8256	0.9428	0.7980	0.8065	
		11	0.8312	0.8202	0.8264	0.9763	0.7969	0.8050	
		12	0.8313	0.8201	0.8264	0.9356	0.7980	0.8066	
		13	0.8296	0.8192	0.8254	0.9330	0.8028	0.8107	
		14	0.8294	0.8179	0.8243	0.9065	0.8110	0.8189	
		15	0.8261	0.8160	0.8222	0.9139	0.8204	0.8275	
		16	0.8252	0.8151	0.8218	0.9438	0.8190	0.8262	
		17	0.8230	0.8143	0.8213	0.9654	0.8160	0.8236	
		18	0.8204	0.8135	0.8208	0.9623	0.8147	0.8223	
		19	0.8177	0.8144	0.8213	0.9381	0.8133	0.8215	
		20	0.8054	0.8148	0.8213	0.8576	0.8111	0.8192	
	Mexico SCT	1	0.9291	0.9354	0.9416	1.0089	0.9626	0.9655	0.9329 0.9376 0.9414
		2	0.9276	0.9352	0.9402	0.9809	0.9609	0.9641	
		3	0.9256	0.9346	0.9392	0.9817	0.9561	0.9595	
		4	0.9240	0.9339	0.9383	0.9716	0.9538	0.9572	
		5	0.9224	0.9332	0.9376	0.9704	0.9522	0.9556	
		6	0.9201	0.9321	0.9367	0.9615	0.9487	0.9522	
		7	0.9184	0.9314	0.9361	0.9616	0.9478	0.9513	
		8	0.9156	0.9305	0.9358	0.9578	0.9380	0.9419	
		9	0.9140	0.9302	0.9351	0.9555	0.9373	0.9411	
		10	0.9118	0.9298	0.9345	0.9604	0.9355	0.9394	
		11	0.9099	0.9294	0.9339	0.9644	0.9350	0.9389	
		12	0.9080	0.9291	0.9336	0.9544	0.9346	0.9385	
		13	0.9044	0.9283	0.9331	0.9481	0.9331	0.9371	
		14	0.9018	0.9278	0.9328	0.9434	0.9329	0.9369	
		15	0.8967	0.9272	0.9328	0.9671	0.9287	0.9328	
		16	0.8944	0.9272	0.9323	1.0133	0.9284	0.9326	
		17	0.8892	0.9271	0.9320	1.0894	0.9278	0.9320	
		18	0.8842	0.9270	0.9317	1.1017	0.9278	0.9320	
		19	0.8762	0.9273	0.9322	1.0265	0.9275	0.9317	
		20	0.8571	0.9274	0.9331	0.9468	0.9270	0.9313	
	Northridge	1	0.7809	0.7605	0.7653	0.9038	0.8248	0.8332	0.7847 0.7631 0.7677
		2	0.7798	0.7610	0.7657	0.8615	0.7982	0.8086	
		3	0.7785	0.7612	0.7659	0.8696	0.7893	0.7992	
		4	0.7775	0.7612	0.7659	0.8648	0.7900	0.7988	
		5	0.7766	0.7610	0.7657	0.8556	0.7928	0.8007	
		6	0.7752	0.7607	0.7654	0.8396	0.7939	0.8015	
		7	0.7743	0.7607	0.7654	0.8349	0.7931	0.8003	
		8	0.7723	0.7605	0.7651	0.8325	0.7727	0.7786	
		9	0.7712	0.7608	0.7655	0.8301	0.7688	0.7746	
		10	0.7698	0.7611	0.7659	0.8415	0.7653	0.7714	
		11	0.7688	0.7615	0.7663	0.8503	0.7648	0.7711	
		12	0.7677	0.7617	0.7665	0.8339	0.7652	0.7716	
		13	0.7654	0.7620	0.7668	0.8246	0.7656	0.7718	
		14	0.7639	0.7623	0.7672	0.8150	0.7667	0.7726	
		15	0.7613	0.7625	0.7674	0.8355	0.7636	0.7686	

		16	0.7598	0.7630	0.7680	0.8797	0.7644	0.7693			
		17	0.7549	0.7635	0.7686	0.9762	0.7645	0.7696			
		18	0.7524	0.7641	0.7693	0.9845	0.7651	0.7703			
		19	0.7456	0.7636	0.7687	0.9021	0.7659	0.7712			
		20	0.7302	0.7633	0.7684	0.8107	0.7672	0.7726			
	El Centro	1	0.8409	0.8253	0.8310	0.8895	0.8204	0.8318	0.8452	0.8284	0.8339
		2	0.8405	0.8278	0.8333	0.8716	0.8003	0.8125			
		3	0.8400	0.8306	0.8359	0.8623	0.7931	0.8048			
		4	0.8399	0.8328	0.8381	0.8593	0.7913	0.8024			
		5	0.8396	0.8344	0.8397	0.8582	0.7912	0.8020			
		6	0.8391	0.8353	0.8406	0.8607	0.7917	0.8025			
		7	0.8385	0.8353	0.8407	0.8572	0.7932	0.8033			
		8	0.8368	0.8343	0.8395	0.8737	0.8009	0.8102			
		9	0.8358	0.8331	0.8388	0.8923	0.8096	0.8183			
		10	0.8343	0.8306	0.8367	0.9302	0.8185	0.8271			
		11	0.8334	0.8276	0.8341	0.9797	0.8250	0.8335			
		12	0.8324	0.8248	0.8316	0.9376	0.8309	0.8390			
		13	0.8303	0.8199	0.8270	0.9222	0.8388	0.8462			
		14	0.8291	0.8168	0.8242	0.8959	0.8422	0.8491			
		15	0.8266	0.8135	0.8209	0.8895	0.8232	0.8304			
		16	0.8252	0.8124	0.8203	0.9128	0.8161	0.8240			
		17	0.8227	0.8115	0.8197	0.9872	0.8114	0.8200			
		18	0.8231	0.8107	0.8192	0.9925	0.8102	0.8190			
		19	0.8177	0.8126	0.8207	0.9064	0.8089	0.8180			
		20	0.8074	0.8138	0.8213	0.8475	0.8079	0.8171			
	Taft	1	0.7861	0.7650	0.7693	0.8964	0.8010	0.8100	0.7899	0.7676	0.7719
		2	0.7852	0.7657	0.7700	0.8521	0.7816	0.7908			
		3	0.7842	0.7663	0.7705	0.8470	0.7759	0.7847			
		4	0.7834	0.7666	0.7708	0.8381	0.7758	0.7841			
		5	0.7825	0.7667	0.7709	0.8412	0.7773	0.7848			
		6	0.7813	0.7666	0.7709	0.8408	0.7793	0.7862			
		7	0.7806	0.7667	0.7709	0.8427	0.7818	0.7880			
		8	0.7789	0.7666	0.7707	0.8419	0.7748	0.7805			
		9	0.7780	0.7670	0.7713	0.8425	0.7730	0.7786			
		10	0.7771	0.7674	0.7717	0.8617	0.7704	0.7763			
		11	0.7765	0.7679	0.7723	0.8857	0.7695	0.7754			
		12	0.7758	0.7682	0.7727	0.8560	0.7692	0.7751			
		13	0.7747	0.7687	0.7732	0.8347	0.7687	0.7744			
		14	0.7740	0.7691	0.7737	0.8268	0.7699	0.7751			
		15	0.7720	0.7693	0.7739	0.8428	0.7694	0.7741			
		16	0.7705	0.7697	0.7745	0.8721	0.7709	0.7756			
		17	0.7674	0.7701	0.7750	0.9386	0.7712	0.7762			
		18	0.7663	0.7705	0.7755	0.9520	0.7717	0.7769			
		19	0.7595	0.7701	0.7749	0.8894	0.7723	0.7776			
		20	0.7480	0.7697	0.7744	0.8163	0.7726	0.7780			

Tabla A.18.- Índices (J7 y J8) de desempeño del marco de 20 niveles Activo

Escala del Registro	Registro	N	J7			J8		
			PID	LQR	LQG	PID	LQR	LQG
0.5 m/s	Kobe	1	0.5050	1.0000	1.0000	0.0831	0.3394	0.3354
		2	0.6582	0.6007	0.5339	0.1078	0.1222	0.1189

		3	0.7510	0.4534	0.4064	0.1252	0.0916	0.0893
		4	0.8146	0.3129	0.2920	0.1363	0.0629	0.0615
		5	0.8556	0.2796	0.2801	0.1452	0.0563	0.0551
		6	0.9022	0.4282	0.4539	0.1578	0.0831	0.0817
		7	0.9572	0.4726	0.5033	0.1688	0.0874	0.0861
		8	1.0000	1.0000	1.0000	0.1993	0.2016	0.1982
		9	1.0000	0.5359	0.5713	0.2117	0.0916	0.0908
		10	1.0000	0.4359	0.4624	0.2207	0.0729	0.0725
		11	1.0000	0.2680	0.2837	0.2246	0.0445	0.0444
		12	1.0000	0.2409	0.2515	0.2294	0.0400	0.0401
		13	1.0000	0.3907	0.3989	0.2399	0.0652	0.0656
		14	1.0000	0.3874	0.3896	0.2480	0.0650	0.0655
		15	1.0000	0.8640	0.8537	0.2672	0.1448	0.1463
		16	1.0000	0.3635	0.3603	0.2723	0.0594	0.0601
		17	1.0000	0.2287	0.2277	0.2752	0.0367	0.0371
		18	1.0000	0.1045	0.1049	0.2741	0.0165	0.0167
		19	1.0000	0.1139	0.1139	0.2772	0.0181	0.0183
		20	1.0000	0.1112	0.1106	0.2787	0.0179	0.0184
	Mexico SCT	1	0.2787	1.0000	1.0000	0.0511	0.2853	0.2819
		2	0.3625	0.5000	0.4984	0.0668	0.0934	0.0921
		3	0.4232	0.3743	0.3727	0.0784	0.0701	0.0691
		4	0.4651	0.2564	0.2547	0.0862	0.0481	0.0474
		5	0.5055	0.2286	0.2267	0.0933	0.0429	0.0423
		6	0.5614	0.3346	0.3317	0.1036	0.0629	0.0621
		7	0.6159	0.3492	0.3459	0.1142	0.0657	0.0648
		8	0.7367	0.8043	0.7965	0.1387	0.1513	0.1494
		9	0.7974	0.3606	0.3577	0.1492	0.0679	0.0670
		10	0.8419	0.2843	0.2825	0.1575	0.0535	0.0528
		11	0.8681	0.1713	0.1708	0.1620	0.0322	0.0318
		12	0.8863	0.1524	0.1522	0.1664	0.0287	0.0283
		13	0.9263	0.2412	0.2414	0.1740	0.0453	0.0448
		14	0.9686	0.2341	0.2347	0.1810	0.0440	0.0435
		15	1.0000	0.5048	0.5066	0.1962	0.0949	0.0938
		16	1.0000	0.2035	0.2043	0.1971	0.0383	0.0378
		17	1.0000	0.1238	0.1245	0.1981	0.0232	0.0230
		18	1.0000	0.0548	0.0552	0.1985	0.0103	0.0101
		19	1.0000	0.0616	0.0621	0.1982	0.0116	0.0114
		20	1.0000	0.0617	0.0623	0.1984	0.0116	0.0114
	Northridge	1	0.3584	1.0000	1.0000	0.1107	0.4634	0.4569
		2	0.4556	0.5786	0.5643	0.1444	0.1703	0.1673
		3	0.5344	0.4388	0.4279	0.1689	0.1280	0.1258
		4	0.5914	0.3040	0.2967	0.1851	0.0879	0.0865
		5	0.6483	0.2736	0.2671	0.1995	0.0786	0.0775
		6	0.7233	0.4066	0.3961	0.2202	0.1157	0.1141
		7	0.8054	0.4290	0.4174	0.2421	0.1210	0.1195
		8	1.0000	1.0000	0.9744	0.2933	0.2795	0.2764
		9	1.0000	0.4539	0.4422	0.3157	0.1255	0.1242
		10	1.0000	0.3627	0.3541	0.3309	0.0991	0.0981
		11	1.0000	0.2213	0.2165	0.3374	0.0598	0.0592
		12	1.0000	0.1983	0.1942	0.3448	0.0533	0.0527
		13	1.0000	0.3179	0.3112	0.3590	0.0847	0.0838
		14	1.0000	0.3103	0.3036	0.3681	0.0826	0.0817
		15	1.0000	0.6715	0.6561	0.3882	0.1795	0.1775
		16	1.0000	0.2717	0.2658	0.3908	0.0727	0.0719

		17	1.0000	0.1673	0.1630	0.3914	0.0445	0.0440
		18	1.0000	0.0751	0.0733	0.3943	0.0198	0.0196
		19	1.0000	0.0847	0.0817	0.3949	0.0222	0.0219
		20	1.0000	0.0845	0.0811	0.3916	0.0222	0.0218
	El Centro	1	0.5155	1.0000	1.0000	0.1182	0.3990	0.3886
		2	0.6670	0.5983	0.5914	0.1527	0.1478	0.1430
		3	0.7810	0.4343	0.4303	0.1763	0.1101	0.1067
		4	0.8450	0.2869	0.2929	0.1900	0.0751	0.0730
		5	0.9009	0.2546	0.2624	0.2004	0.0668	0.0652
		6	0.9441	0.3783	0.3870	0.2135	0.0983	0.0964
		7	0.9716	0.3999	0.4056	0.2260	0.1033	0.1018
		8	1.0000	0.9163	1.0000	0.2565	0.2408	0.2388
		9	1.0000	0.4156	0.4795	0.2684	0.1094	0.1089
		10	1.0000	0.3420	0.4076	0.2773	0.0882	0.0883
		11	1.0000	0.2149	0.2647	0.2791	0.0546	0.0548
		12	1.0000	0.2006	0.2480	0.2848	0.0497	0.0501
		13	1.0000	0.3524	0.4300	0.2949	0.0825	0.0837
		14	1.0000	0.3641	0.4404	0.3042	0.0831	0.0844
		15	1.0000	0.8324	0.9986	0.3307	0.1865	0.1901
		16	1.0000	0.3449	0.4108	0.3391	0.0769	0.0784
		17	1.0000	0.2127	0.2522	0.3443	0.0476	0.0486
		18	1.0000	0.0959	0.1125	0.3459	0.0215	0.0219
		19	1.0000	0.1033	0.1216	0.3488	0.0235	0.0240
		20	1.0000	0.1010	0.1280	0.3508	0.0231	0.0240
	Taft	1	0.6237	1.0000	1.0000	0.1284	0.4762	0.4722
		2	0.8060	0.7999	0.7791	0.1669	0.2016	0.1975
		3	0.8988	0.6010	0.5847	0.1945	0.1512	0.1482
		4	0.9523	0.4115	0.4006	0.2127	0.1038	0.1018
		5	0.9965	0.3647	0.3552	0.2281	0.0927	0.0911
		6	1.0000	0.5297	0.5140	0.2503	0.1363	0.1343
		7	1.0000	0.5476	0.5313	0.2721	0.1428	0.1408
		8	1.0000	1.0000	1.0000	0.3201	0.3266	0.3238
		9	1.0000	0.5551	0.5388	0.3379	0.1485	0.1469
		10	1.0000	0.4299	0.4235	0.3509	0.1176	0.1165
		11	1.0000	0.2561	0.2566	0.3550	0.0712	0.0707
		12	1.0000	0.2244	0.2292	0.3600	0.0637	0.0632
		13	1.0000	0.3553	0.3654	0.3741	0.1021	0.1016
		14	1.0000	0.3472	0.3568	0.3832	0.1002	0.0999
		15	1.0000	0.7545	0.7776	0.4073	0.2197	0.2191
		16	1.0000	0.3076	0.3157	0.4132	0.0893	0.0891
		17	1.0000	0.1884	0.1932	0.4160	0.0548	0.0546
		18	1.0000	0.0832	0.0855	0.4166	0.0244	0.0244
		19	1.0000	0.0928	0.0959	0.4177	0.0272	0.0271
		20	1.0000	0.0925	0.0980	0.4193	0.0270	0.0270
0.25 m/s	Kobe	1	0.2514	0.9582	0.8469	0.0416	0.1946	0.1897
		2	0.3276	0.2987	0.2653	0.0539	0.0602	0.0587
		3	0.3786	0.2253	0.2024	0.0624	0.0452	0.0442
		4	0.4054	0.1558	0.1446	0.0678	0.0310	0.0304
		5	0.4292	0.1394	0.1389	0.0719	0.0278	0.0272
		6	0.4551	0.2132	0.2251	0.0770	0.0410	0.0404
		7	0.4818	0.2344	0.2495	0.0832	0.0431	0.0425
		8	0.5925	0.5724	0.6104	0.0981	0.1002	0.0992
		9	0.6471	0.2642	0.2822	0.1048	0.0452	0.0449
		10	0.6771	0.2153	0.2292	0.1101	0.0360	0.0359

		11	0.6955	0.1331	0.1406	0.1113	0.0220	0.0219
		12	0.7164	0.1196	0.1250	0.1132	0.0198	0.0198
		13	0.7119	0.1937	0.1991	0.1197	0.0322	0.0325
		14	0.7139	0.1899	0.1936	0.1238	0.0321	0.0325
		15	0.7098	0.4315	0.4265	0.1365	0.0714	0.0725
		16	0.7368	0.1812	0.1799	0.1398	0.0293	0.0298
		17	0.7648	0.1143	0.1133	0.1427	0.0181	0.0184
		18	0.7868	0.0523	0.0525	0.1415	0.0081	0.0083
		19	0.7952	0.0566	0.0570	0.1435	0.0089	0.0091
		20	0.8100	0.0555	0.0549	0.1432	0.0088	0.0091
	Mexico SCT	1	0.1411	0.8001	0.7999	0.0253	0.1505	0.1484
		2	0.1802	0.2475	0.2471	0.0330	0.0466	0.0460
		3	0.2129	0.1854	0.1849	0.0388	0.0350	0.0345
		4	0.2326	0.1271	0.1265	0.0427	0.0240	0.0237
		5	0.2524	0.1133	0.1127	0.0462	0.0214	0.0211
		6	0.2758	0.1661	0.1648	0.0513	0.0314	0.0310
		7	0.3070	0.1733	0.1719	0.0565	0.0328	0.0324
		8	0.3685	0.3990	0.3958	0.0686	0.0755	0.0745
		9	0.3955	0.1788	0.1777	0.0740	0.0338	0.0334
		10	0.4171	0.1409	0.1405	0.0781	0.0267	0.0264
		11	0.4311	0.0849	0.0848	0.0804	0.0161	0.0159
		12	0.4423	0.0755	0.0756	0.0826	0.0143	0.0141
		13	0.4618	0.1196	0.1200	0.0863	0.0226	0.0223
		14	0.4778	0.1162	0.1168	0.0897	0.0219	0.0217
		15	0.5237	0.2510	0.2527	0.0972	0.0473	0.0468
		16	0.5419	0.1014	0.1021	0.0982	0.0191	0.0189
		17	0.5512	0.0617	0.0622	0.0980	0.0116	0.0115
		18	0.5621	0.0273	0.0276	0.0979	0.0051	0.0051
		19	0.5577	0.0307	0.0310	0.0987	0.0058	0.0057
		20	0.5654	0.0307	0.0310	0.0981	0.0058	0.0057
	Northridge	1	0.1749	0.9150	0.8951	0.0517	0.2683	0.2639
		2	0.2234	0.2860	0.2794	0.0674	0.0832	0.0818
		3	0.2659	0.2171	0.2123	0.0790	0.0625	0.0615
		4	0.2893	0.1505	0.1475	0.0865	0.0430	0.0423
		5	0.3133	0.1357	0.1329	0.0933	0.0384	0.0379
		6	0.3456	0.2020	0.1972	0.1030	0.0565	0.0558
		7	0.3812	0.2135	0.2078	0.1132	0.0591	0.0585
		8	0.4677	0.4986	0.4857	0.1371	0.1365	0.1352
		9	0.5079	0.2259	0.2207	0.1478	0.0613	0.0608
		10	0.5373	0.1809	0.1767	0.1562	0.0484	0.0480
		11	0.5585	0.1105	0.1081	0.1602	0.0292	0.0290
		12	0.5772	0.0992	0.0970	0.1641	0.0260	0.0258
		13	0.6003	0.1593	0.1559	0.1726	0.0414	0.0410
		14	0.6322	0.1556	0.1526	0.1793	0.0404	0.0400
		15	0.6971	0.3380	0.3306	0.1948	0.0878	0.0870
		16	0.7287	0.1374	0.1342	0.1975	0.0356	0.0352
		17	0.7532	0.0840	0.0823	0.1984	0.0218	0.0216
		18	0.7628	0.0376	0.0368	0.1986	0.0097	0.0096
		19	0.7726	0.0424	0.0414	0.1984	0.0109	0.0107
		20	0.7711	0.0425	0.0407	0.1990	0.0109	0.0107
	El Centro	1	0.2417	0.9736	0.9693	0.0567	0.2359	0.2282
		2	0.3144	0.2966	0.2935	0.0732	0.0727	0.0703
		3	0.3650	0.2152	0.2140	0.0844	0.0541	0.0525
		4	0.3977	0.1422	0.1424	0.0911	0.0369	0.0359

		5	0.4220	0.1248	0.1288	0.0962	0.0329	0.0321
		6	0.4413	0.1859	0.1904	0.1021	0.0483	0.0475
		7	0.4587	0.1965	0.2015	0.1077	0.0508	0.0501
		8	0.4996	0.4512	0.5050	0.1223	0.1184	0.1176
		9	0.5216	0.2091	0.2405	0.1281	0.0538	0.0536
		10	0.5318	0.1717	0.2045	0.1323	0.0433	0.0435
		11	0.5448	0.1081	0.1327	0.1334	0.0268	0.0270
		12	0.5655	0.1003	0.1243	0.1354	0.0244	0.0247
		13	0.5558	0.1763	0.2152	0.1414	0.0406	0.0412
		14	0.5644	0.1823	0.2205	0.1461	0.0408	0.0416
		15	0.6041	0.4167	0.4997	0.1626	0.0918	0.0938
		16	0.6768	0.1726	0.2055	0.1686	0.0378	0.0387
		17	0.7164	0.1065	0.1262	0.1732	0.0234	0.0240
		18	0.7339	0.0482	0.0563	0.1739	0.0106	0.0108
		19	0.7437	0.0520	0.0609	0.1753	0.0115	0.0118
		20	0.7615	0.0509	0.0640	0.1764	0.0114	0.0118
	Taft	1	0.3051	1.0000	1.0000	0.0613	0.3078	0.3038
		2	0.3874	0.3884	0.3772	0.0797	0.0974	0.0955
		3	0.4455	0.2926	0.2850	0.0930	0.0731	0.0717
		4	0.4743	0.2003	0.1949	0.1017	0.0502	0.0493
		5	0.4937	0.1776	0.1730	0.1090	0.0448	0.0441
		6	0.5180	0.2585	0.2511	0.1195	0.0659	0.0650
		7	0.5438	0.2682	0.2611	0.1302	0.0691	0.0682
		8	0.5973	0.6110	0.5963	0.1560	0.1597	0.1581
		9	0.6355	0.2716	0.2673	0.1676	0.0718	0.0712
		10	0.6712	0.2119	0.2112	0.1759	0.0569	0.0564
		11	0.6801	0.1262	0.1282	0.1797	0.0345	0.0342
		12	0.6849	0.1113	0.1150	0.1834	0.0308	0.0306
		13	0.7186	0.1778	0.1856	0.1919	0.0493	0.0492
		14	0.7619	0.1749	0.1813	0.1999	0.0485	0.0484
		15	0.8454	0.3817	0.3960	0.2184	0.1062	0.1061
		16	0.8671	0.1557	0.1611	0.2221	0.0432	0.0431
		17	0.8980	0.0951	0.0985	0.2231	0.0264	0.0265
		18	0.9126	0.0424	0.0437	0.2244	0.0118	0.0118
		19	0.9236	0.0473	0.0489	0.2254	0.0131	0.0131
		20	0.9220	0.0470	0.0497	0.2261	0.0131	0.0131

Apéndice B.- Gráficas de Resultados Para los Registros Escalados a 0.25 m/s

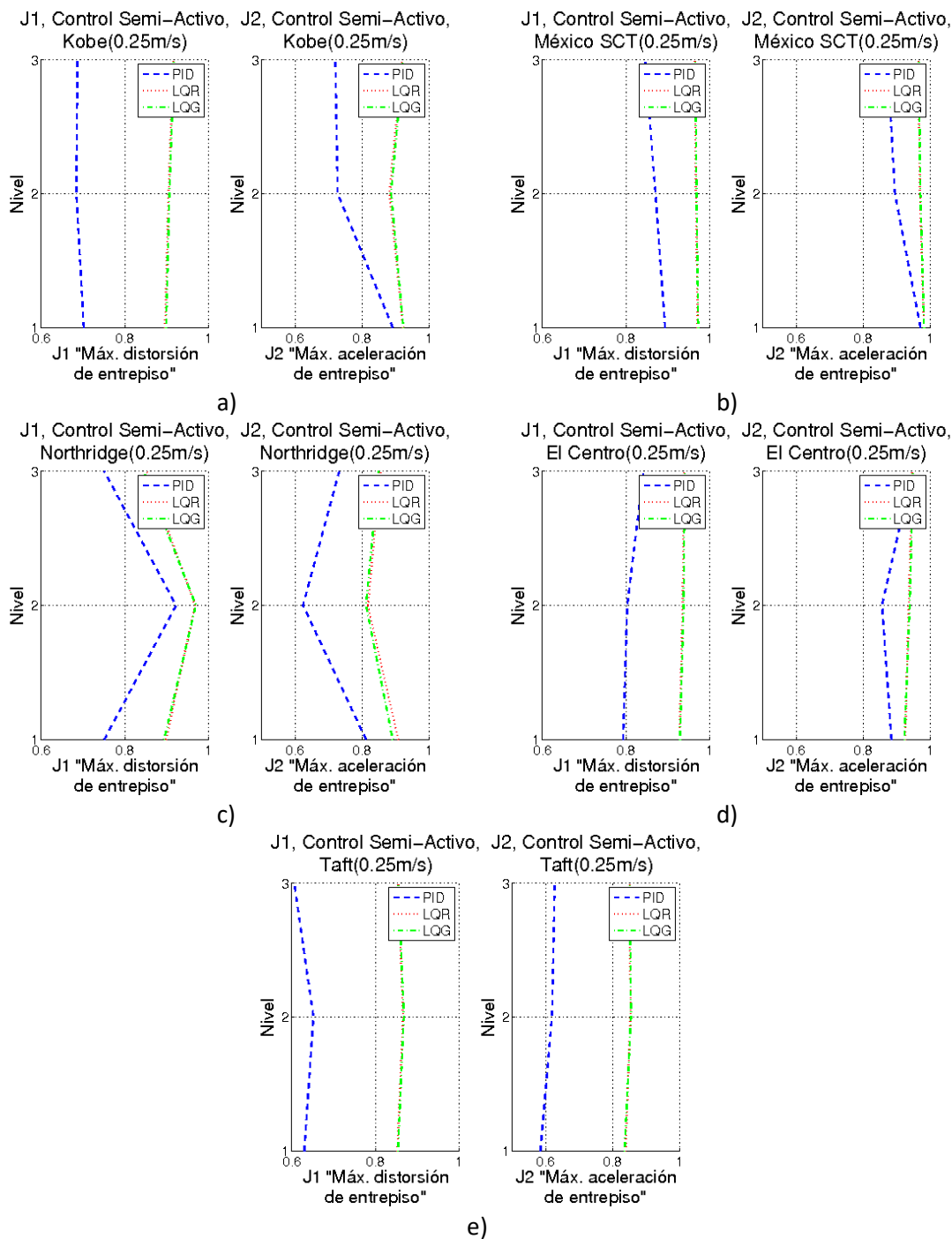


Figura B1.- Gráfica de J1 Y J2 para el marco de 3 niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.25m/s, b) México SCT 0.25m/s, c) Northridge 0.25m/s, d) El Centro 0.25m/s y e) Taft 0.25 m/s

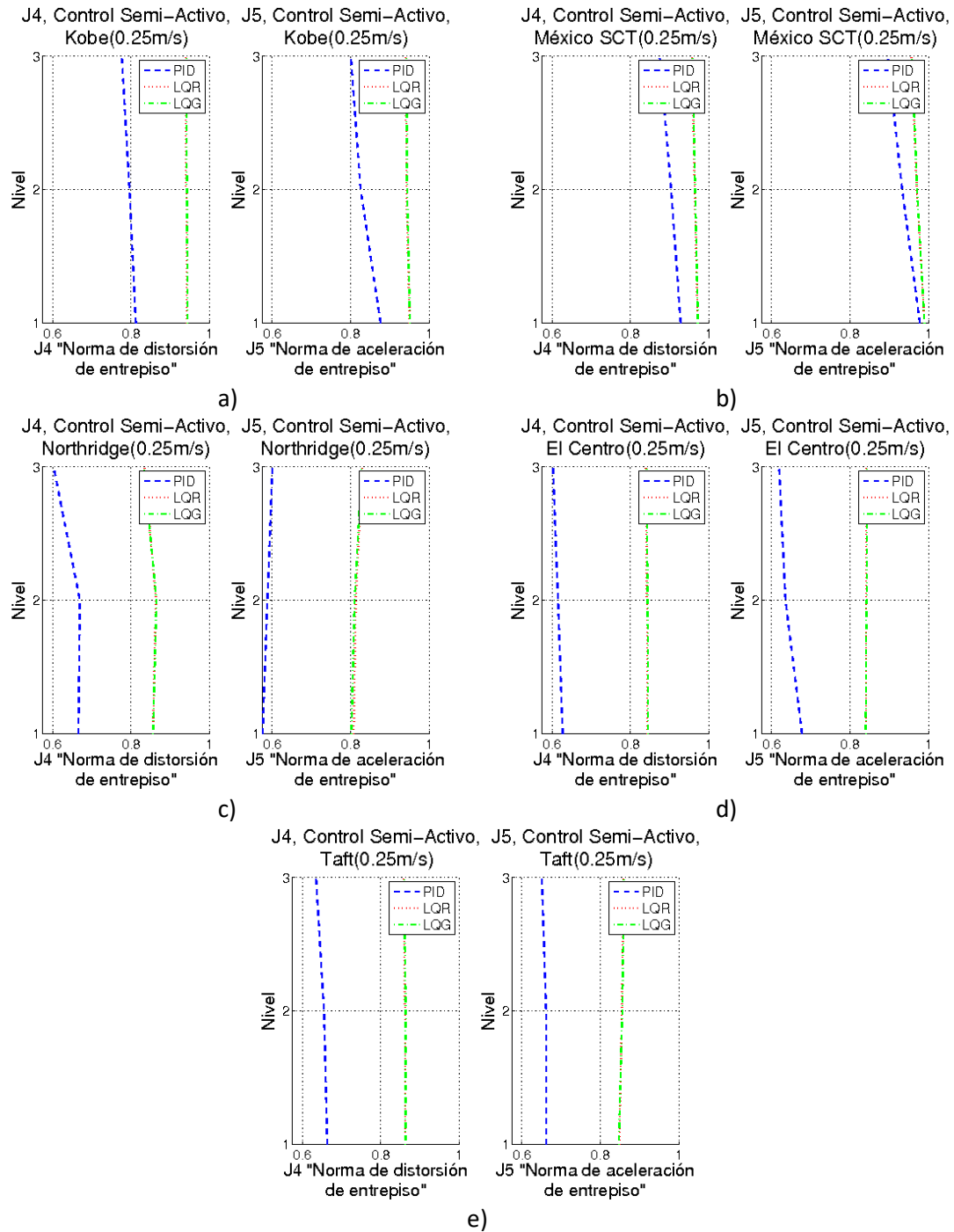


Figura B2.- Gráfica de J4 Y J5 para el marco de 3 niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.25m/s, b) México SCT 0.25m/s, c) Northridge 0.25m/s, d) El Centro 0.25m/s y e) Taft 0.25 m/s

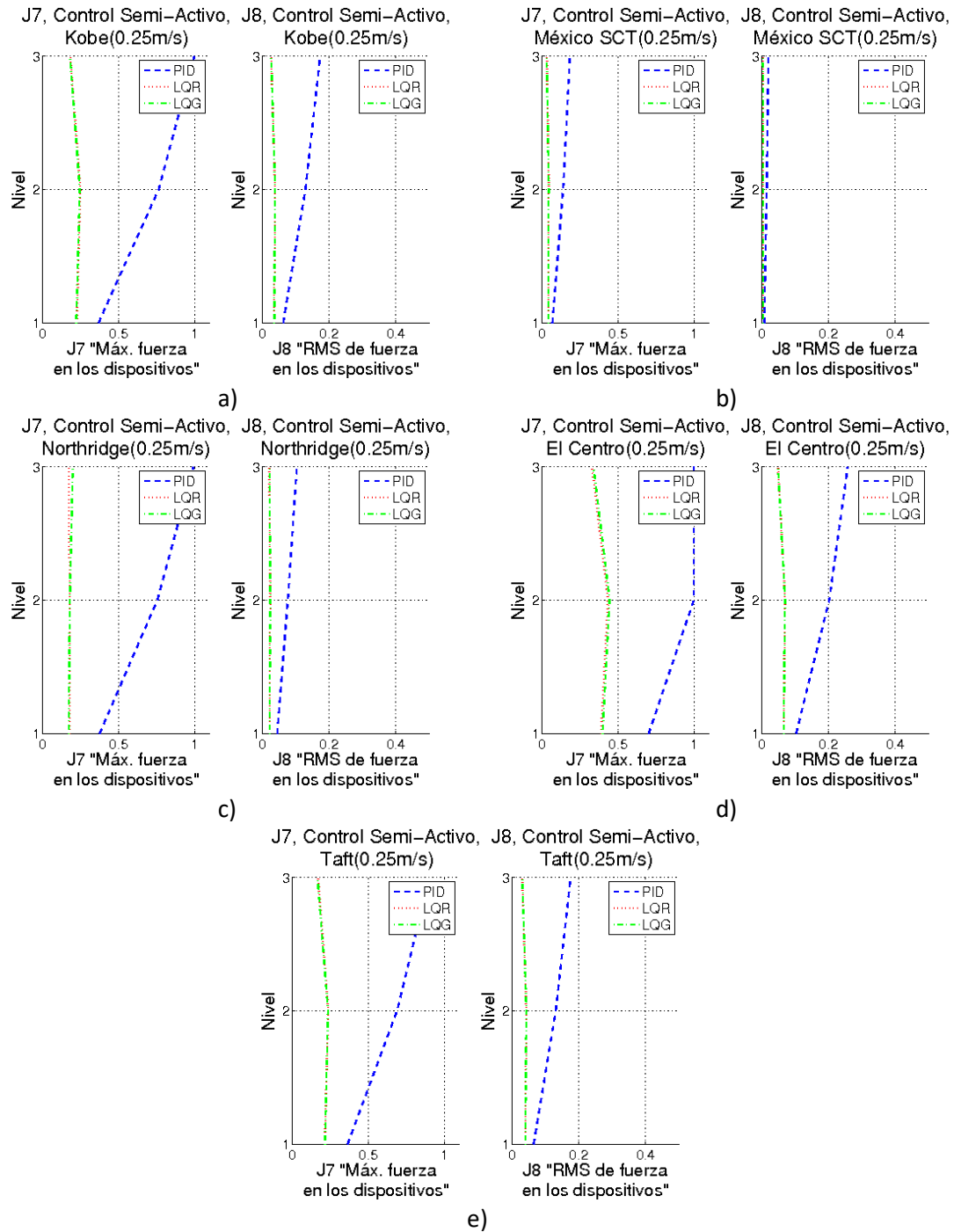


Figura B3.- Gráfica de J7 Y J8 para el marco de 3 niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.25m/s, b) México SCT 0.25m/s, c) Northridge 0.25m/s, d) El Centro 0.25m/s y e) Taft 0.25 m/s

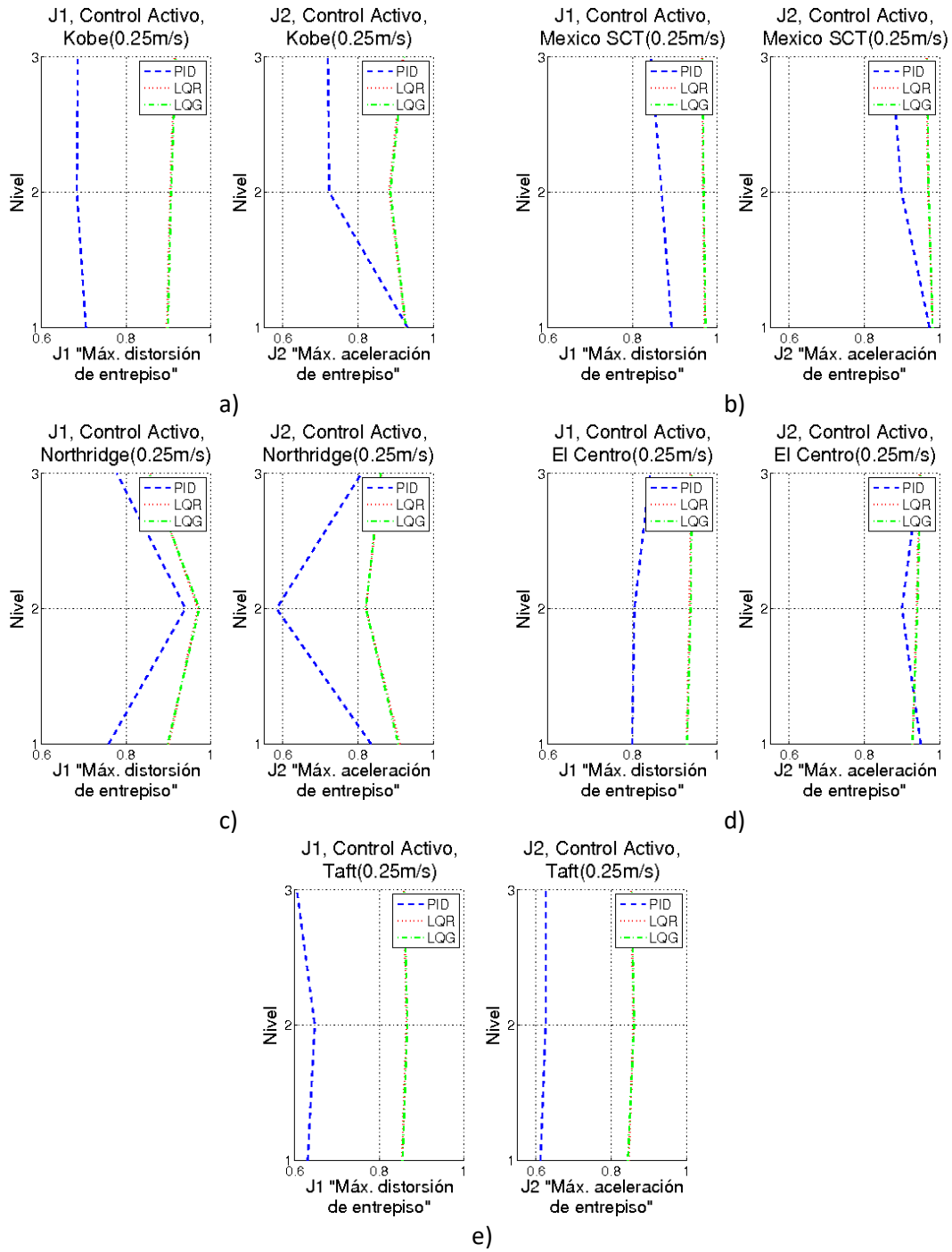


Figura B4.- Gráfica de J1 Y J2 para el marco de 3 niveles en control activo : a) Kobe 0.25m/s, b) México SCT 0.25m/s, c) Northridge 0.25m/s, d) El Centro 0.25m/s y e) Taft 0.25 m/s

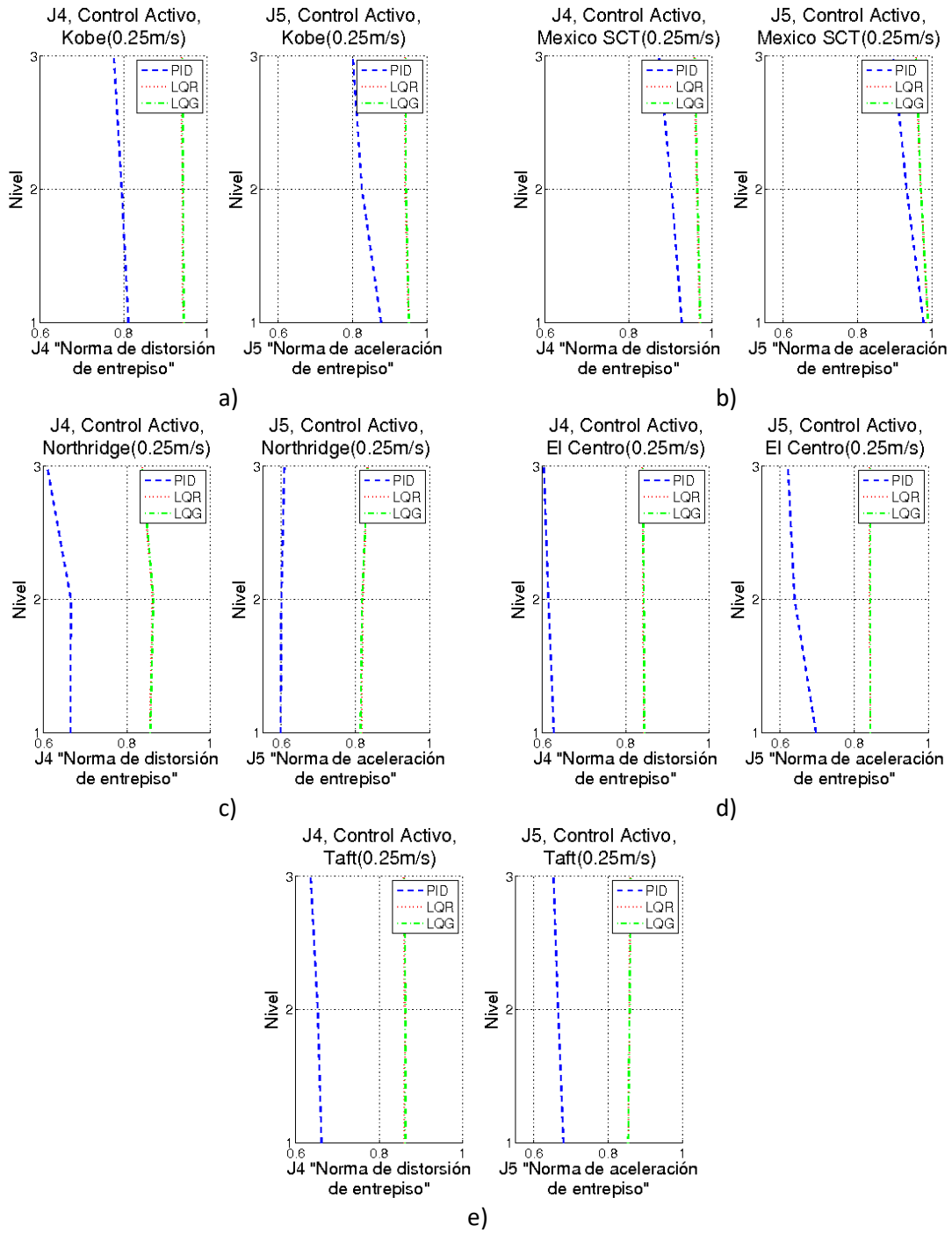


Figura B5.- Gráfica de J4 Y J5 para el marco de 3 niveles en control activo : a) Kobe 0.25m/s, b) México SCT 0.25m/s, c) Northridge 0.25m/s, d) El Centro 0.25m/s y e) Taft 0.25 m/s

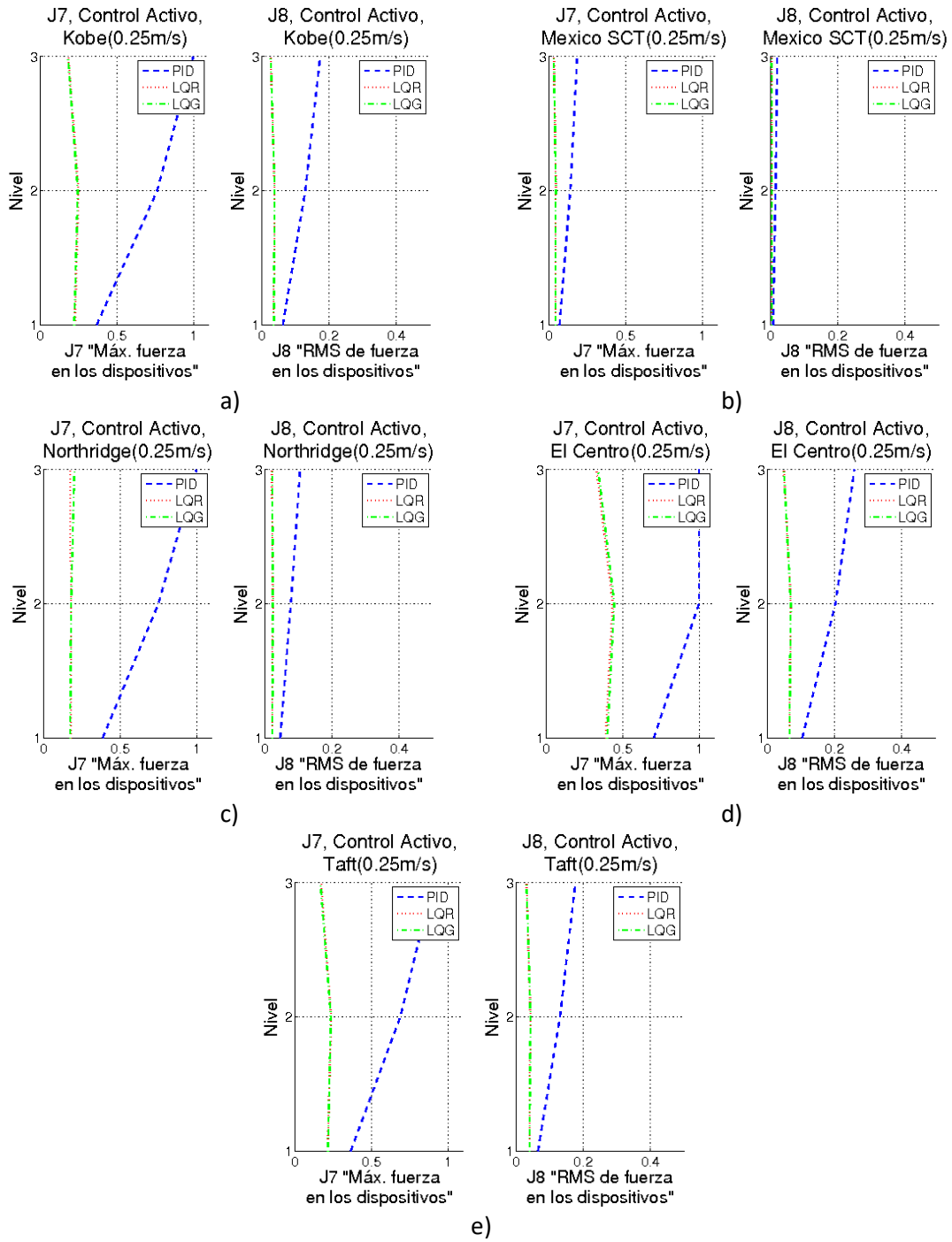


Figura B6.- Gráfica de J7 Y J8 para el marco de 3 niveles en control activo : a) Kobe 0.25m/s, b) México SCT 0.25m/s, c) Northridge 0.25m/s, d) El Centro 0.25m/s y e) Taft 0.25 m/s

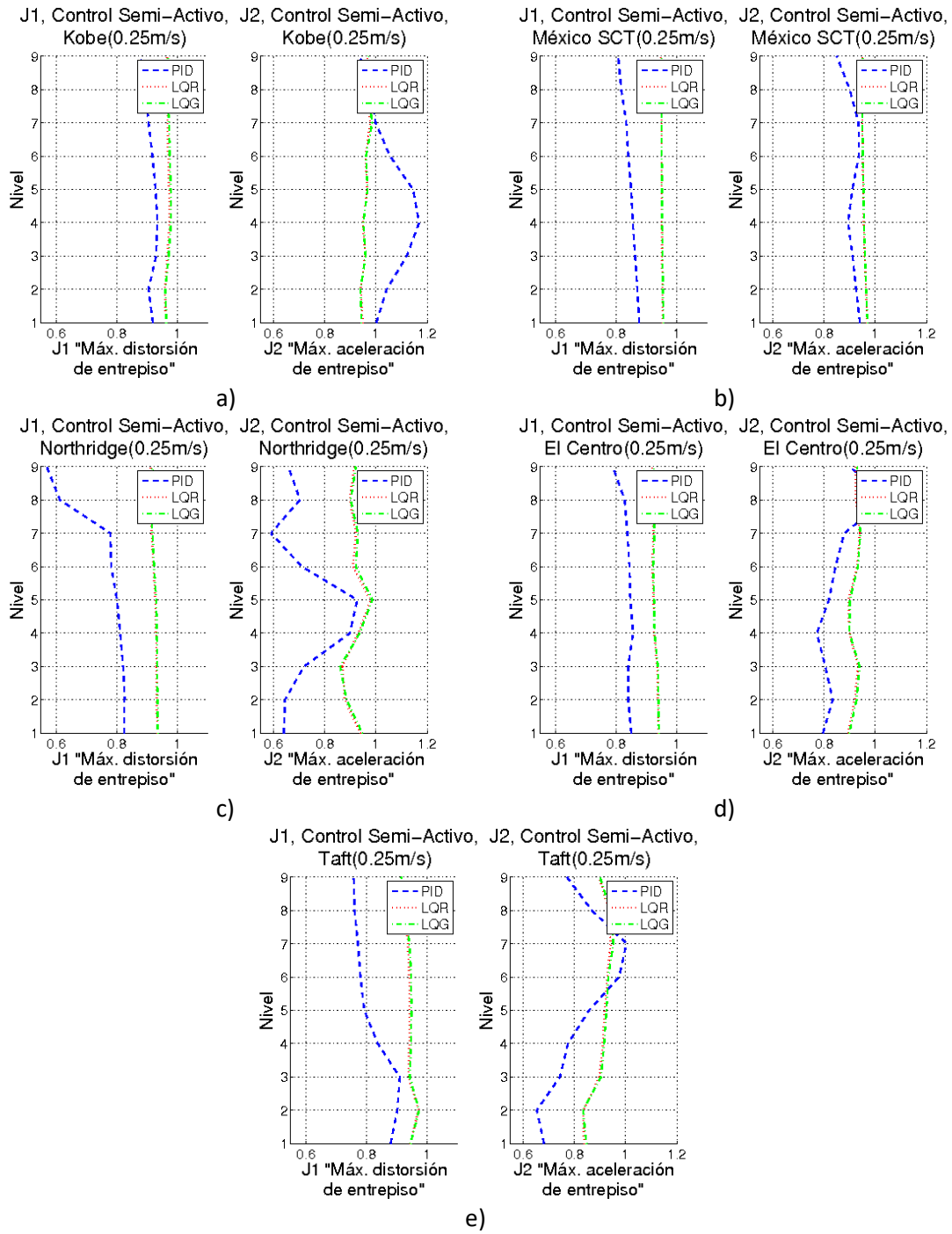


Figura B7.- Gráfica de J1 Y J2 para el marco de 9 niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.25m/s, b) México SCT 0.25m/s, c) Northridge 0.25m/s, d) El Centro 0.25m/s y e) Taft 0.25 m/s

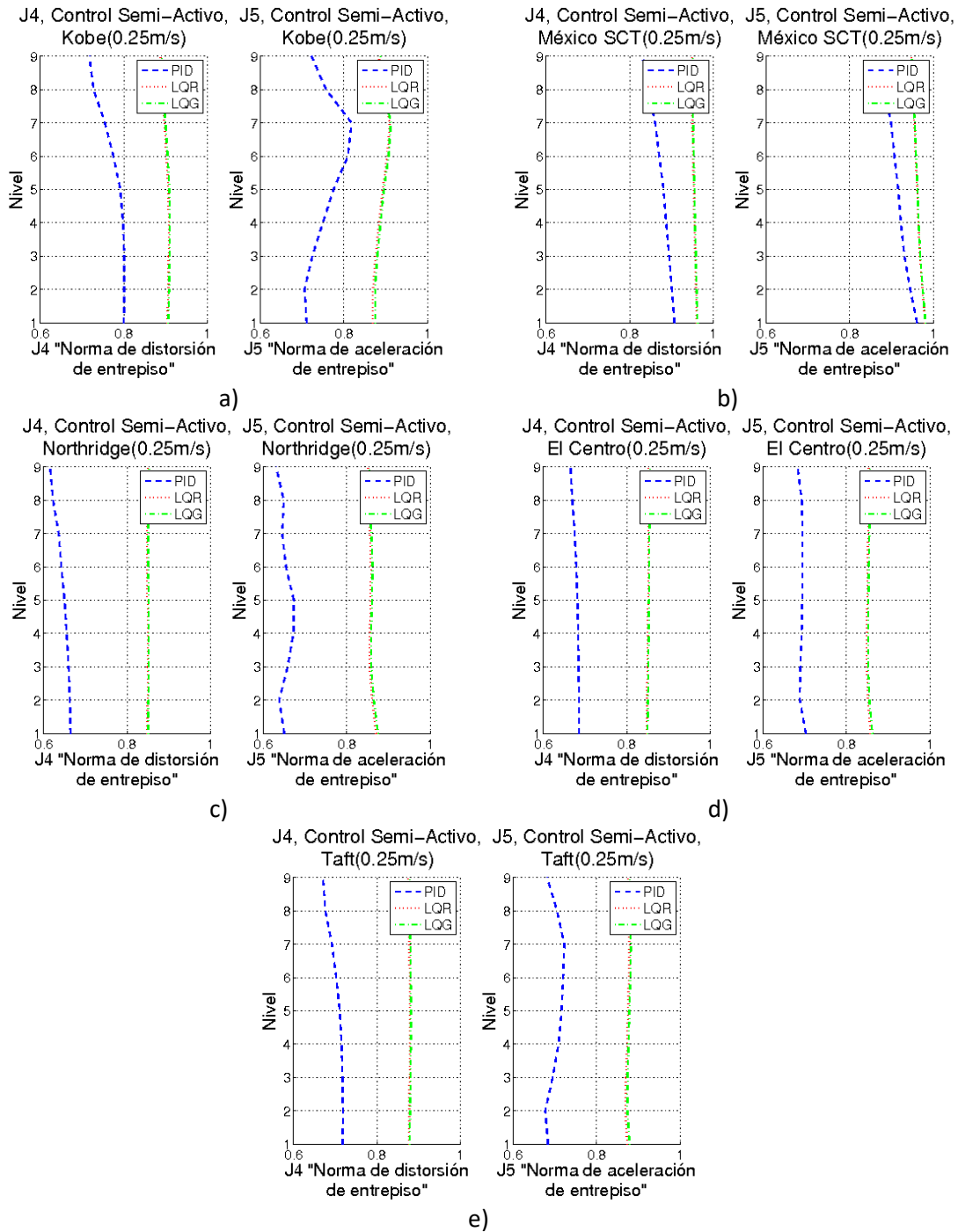


Figura B8.- Gráfica de J4 Y J5 para el marco de 9 niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.25m/s, b) México SCT 0.25m/s, c) Northridge 0.25m/s, d) El Centro 0.25m/s y e) Taft 0.25 m/s

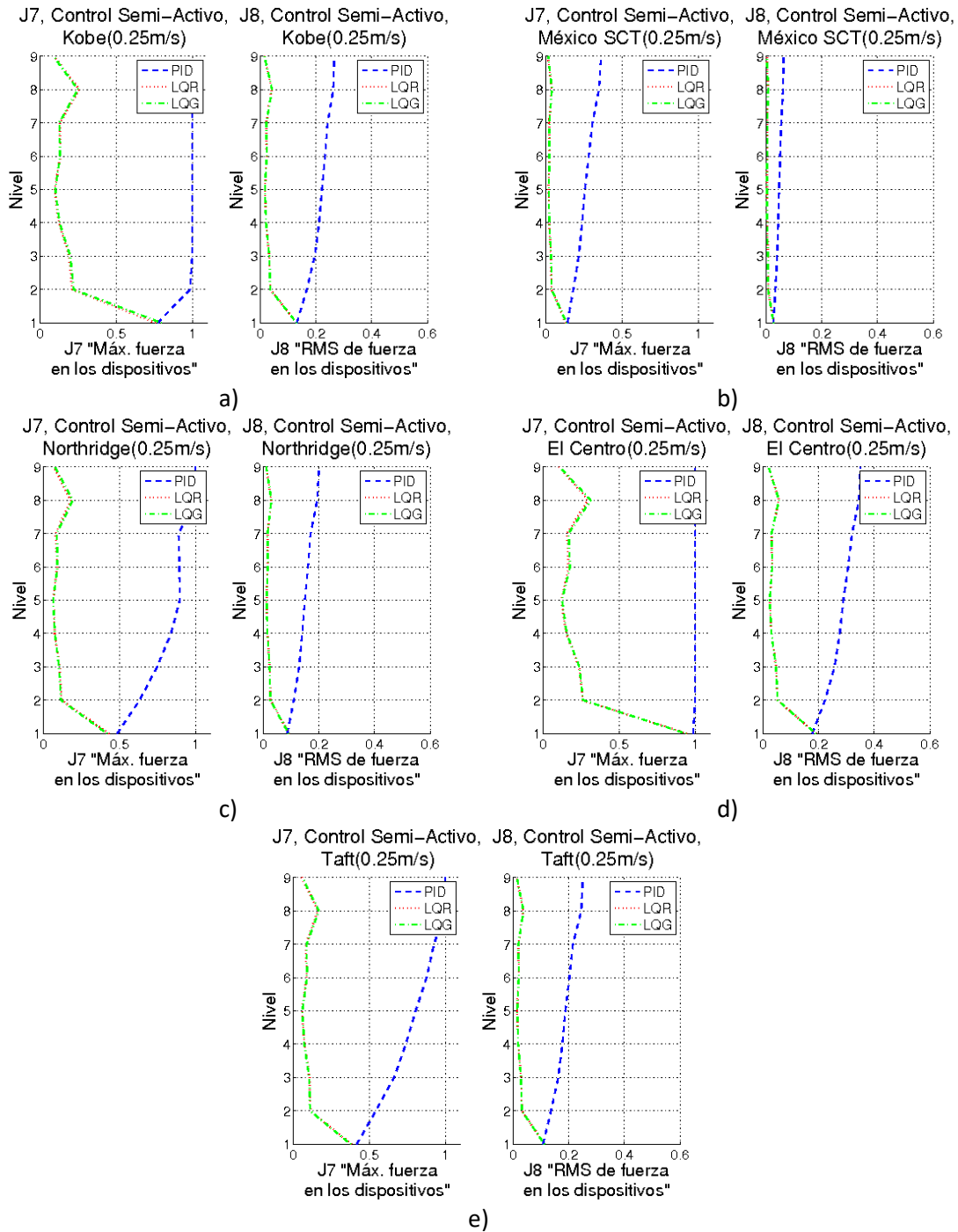


Figura B9.- Gráfica de J7 Y J8 para el marco de 9 niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.25m/s, b) México SCT 0.25m/s, c) Northridge 0.25m/s, d) El Centro 0.25m/s y e) Taft 0.25 m/s

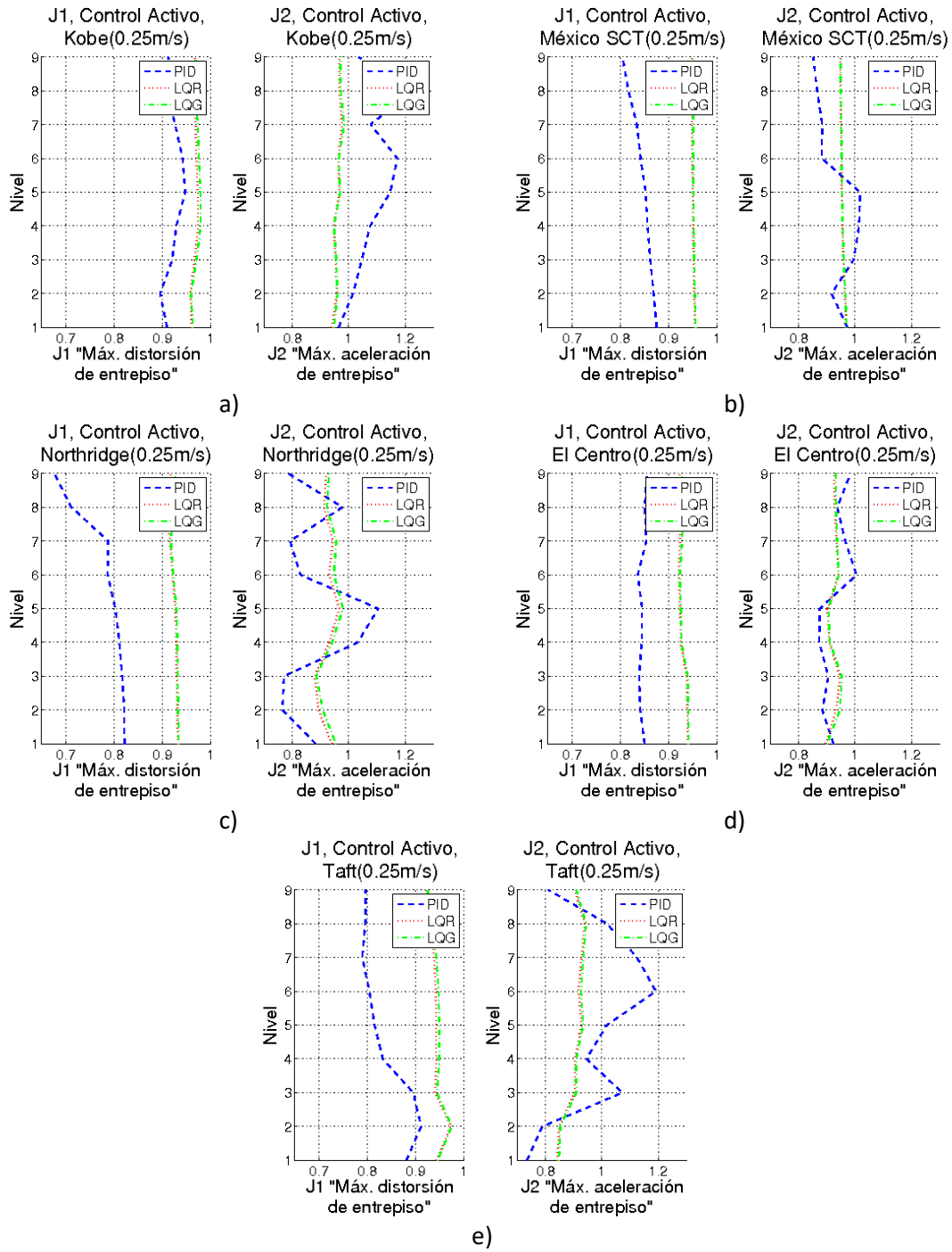


Figura B10.- Gráfica de J1 Y J2 para el marco de 9 niveles en control activo : a) Kobe 0.25m/s, b) México SCT 0.25m/s, c) Northridge 0.25m/s, d) El Centro 0.25m/s y e) Taft 0.25 m/s

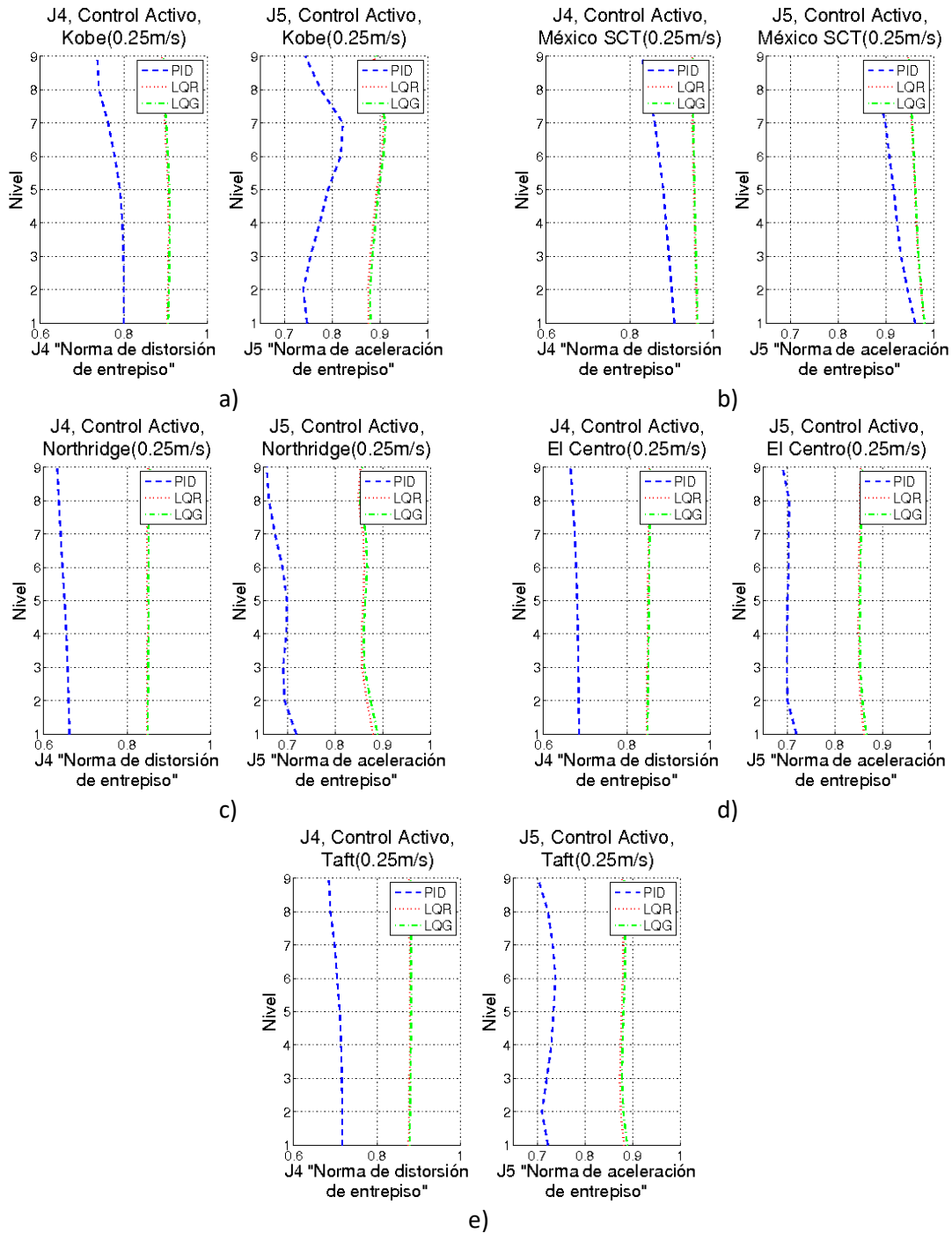


Figura B11.- Gráfica de J4 Y J5 para el marco de 9 niveles en control activo : a) Kobe 0.25m/s, b) México SCT 0.25m/s, c) Northridge 0.25m/s, d) El Centro 0.25m/s y e) Taft 0.25 m/s

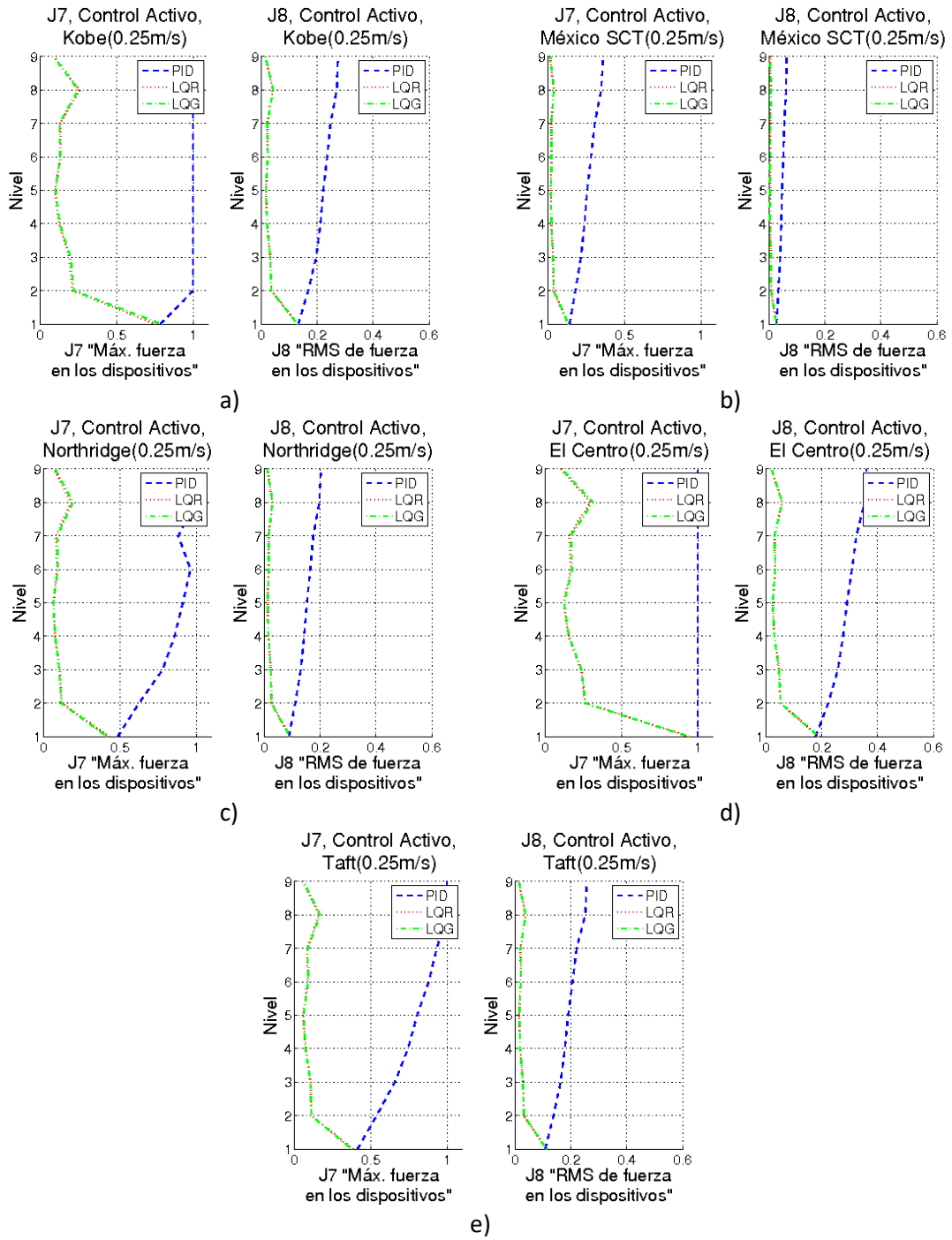


Figura B12.- Gráfica de J7 Y J8 para el marco de 9 niveles en control activo : a) Kobe 0.25m/s, b) México SCT 0.25m/s, c) Northridge 0.25m/s, d) El Centro 0.25m/s y e) Taft 0.25 m/s

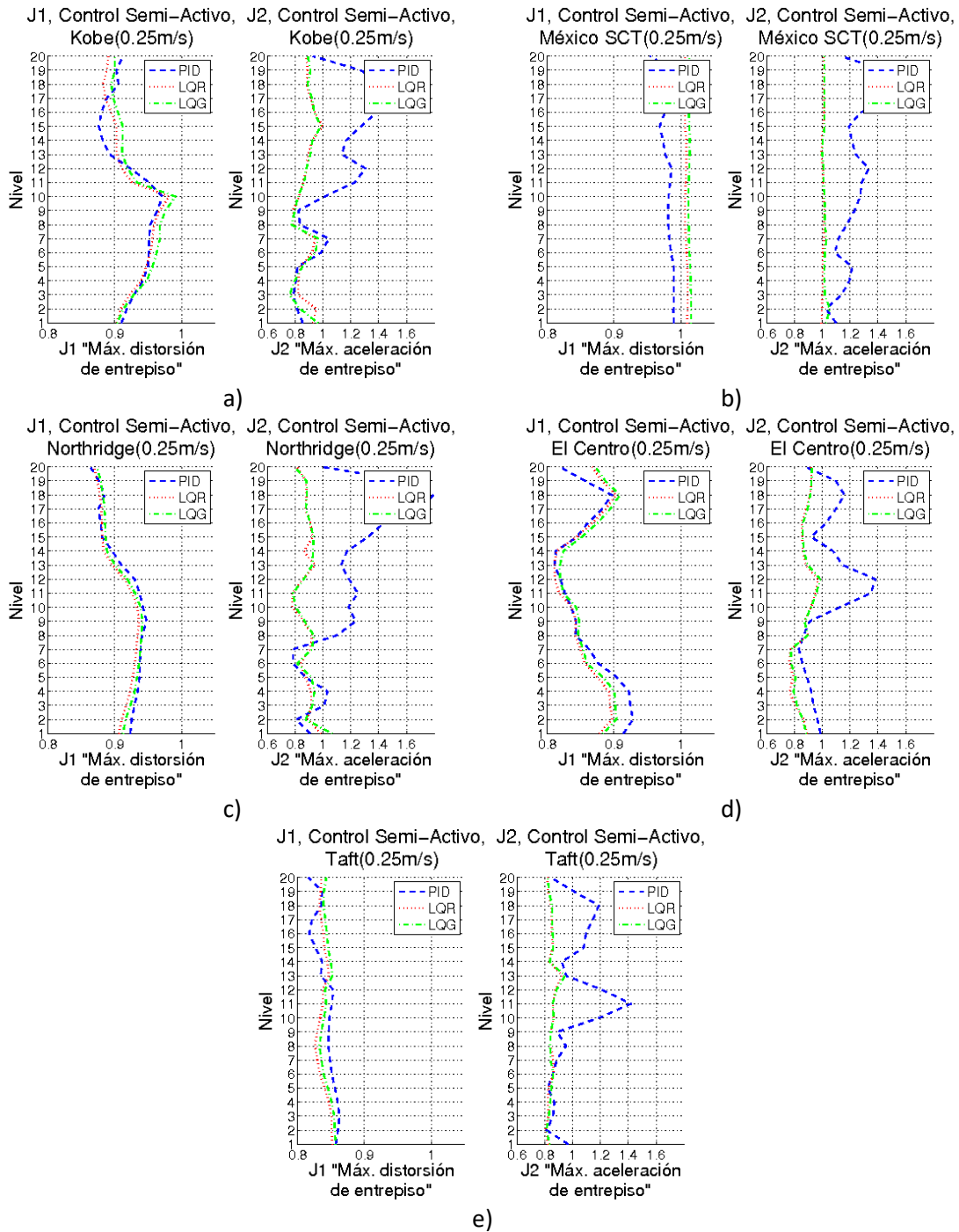


Figura B13.- Gráfica de J1 Y J2 para el marco de 20 niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.25m/s, b) México SCT 0.25m/s, c) Northridge 0.25m/s, d) El Centro 0.25m/s y e) Taft 0.25 m/s

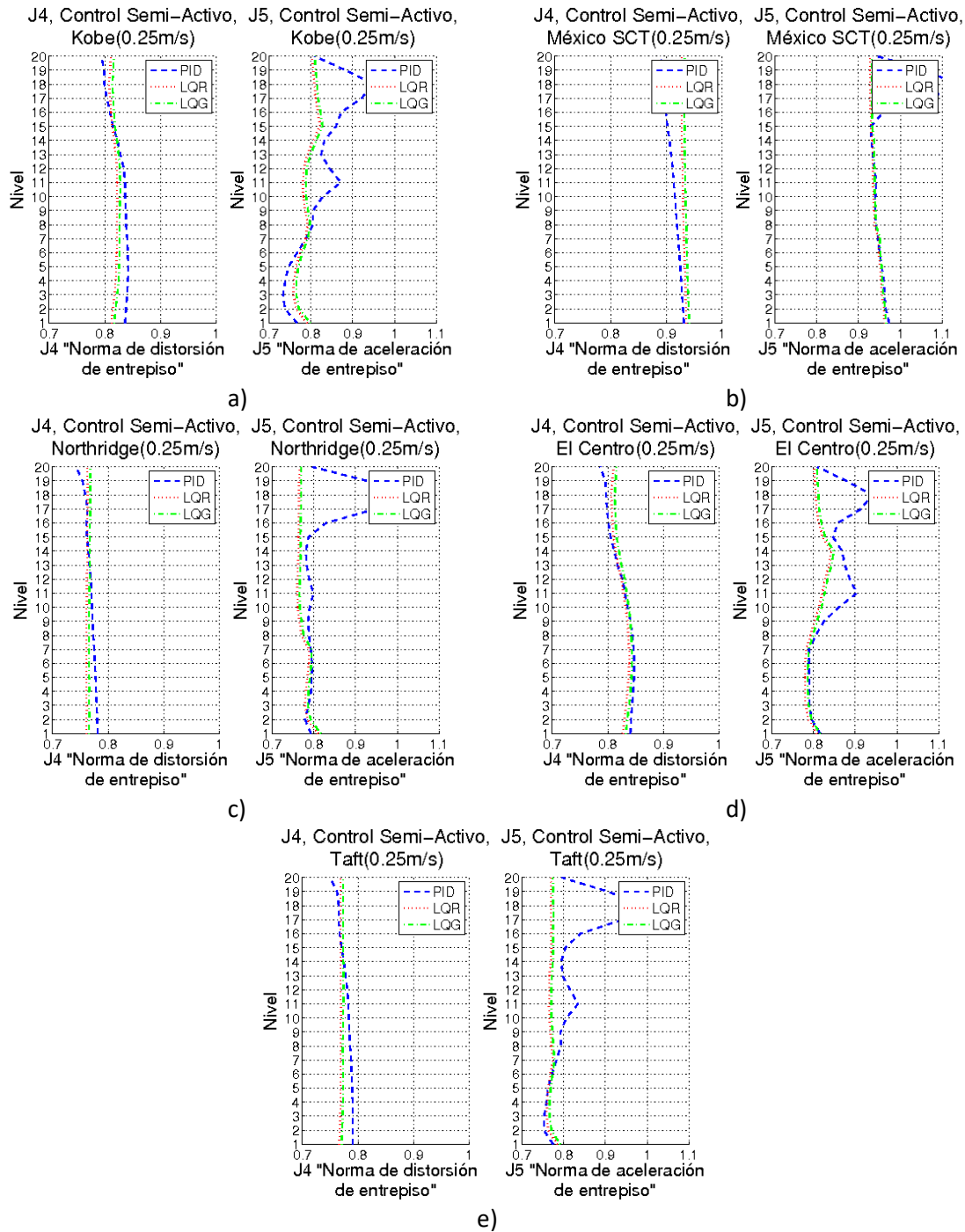


Figura B14.- Gráfica de J4 Y J5 para el marco de 20 niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.25m/s, b) México SCT 0.25m/s, c) Northridge 0.25m/s, d) El Centro 0.25m/s y e) Taft 0.25 m/s

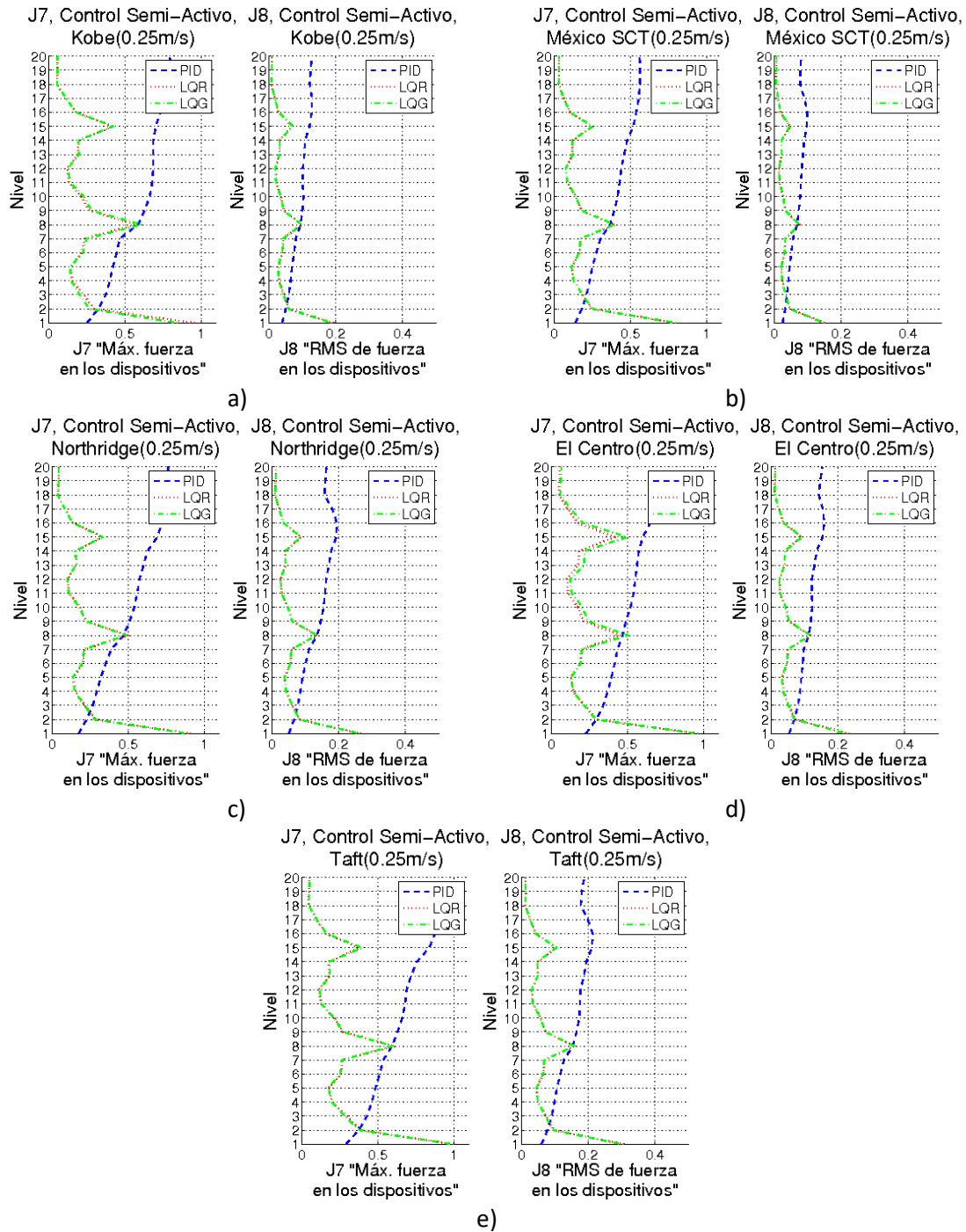


Figura B15.- Gráfica de J7 Y J8 para el marco de 20 niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.25m/s, b) México SCT 0.25m/s, c) Northridge 0.25m/s, d) El Centro 0.25m/s y e) Taft 0.25 m/s

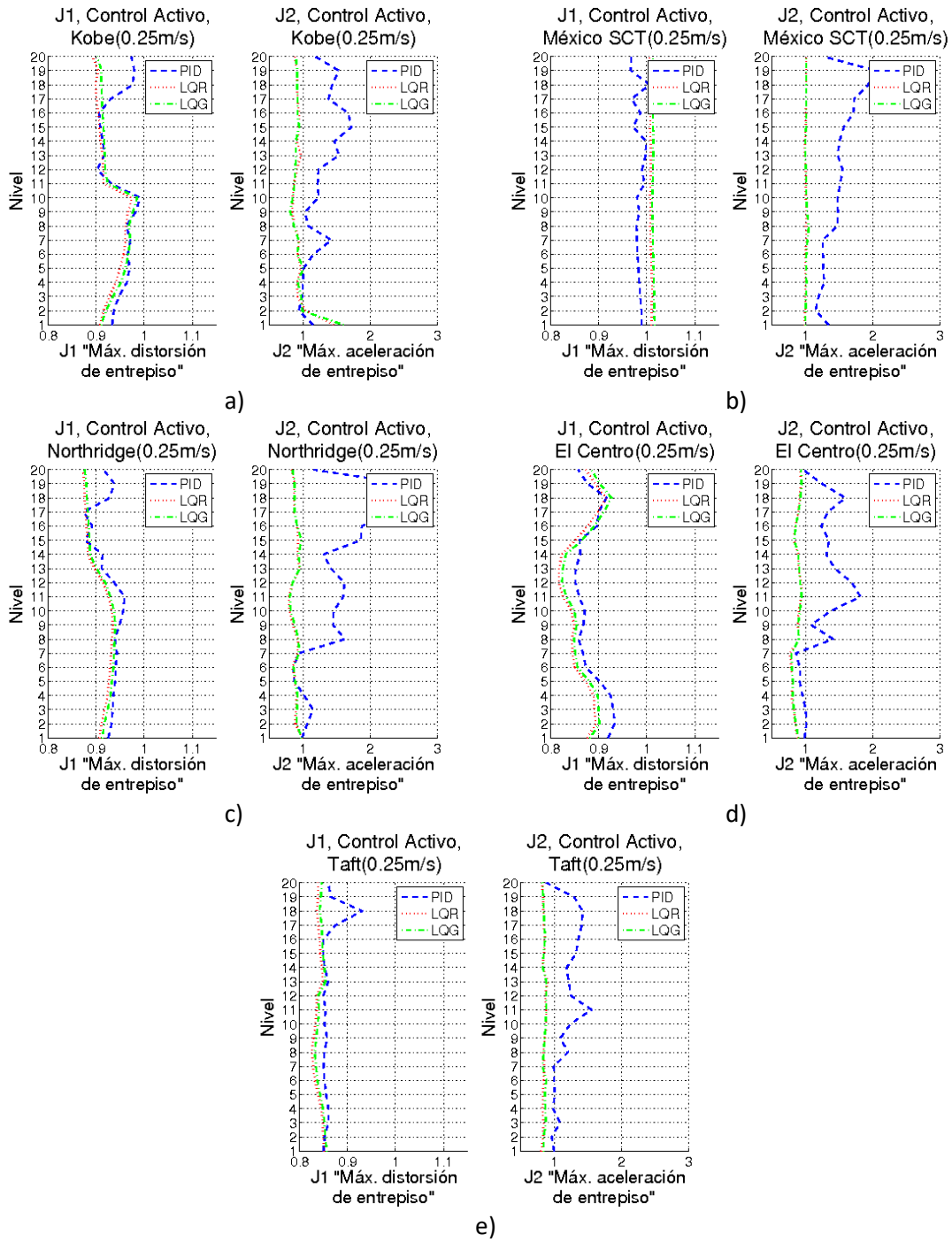


Figura B16.- Gráfica de J1 Y J2 para el marco de 20 niveles en control activo : a) Kobe 0.25m/s, b) México SCT 0.25m/s, c) Northridge 0.25m/s, d) El Centro 0.25m/s y e) Taft 0.25 m/s

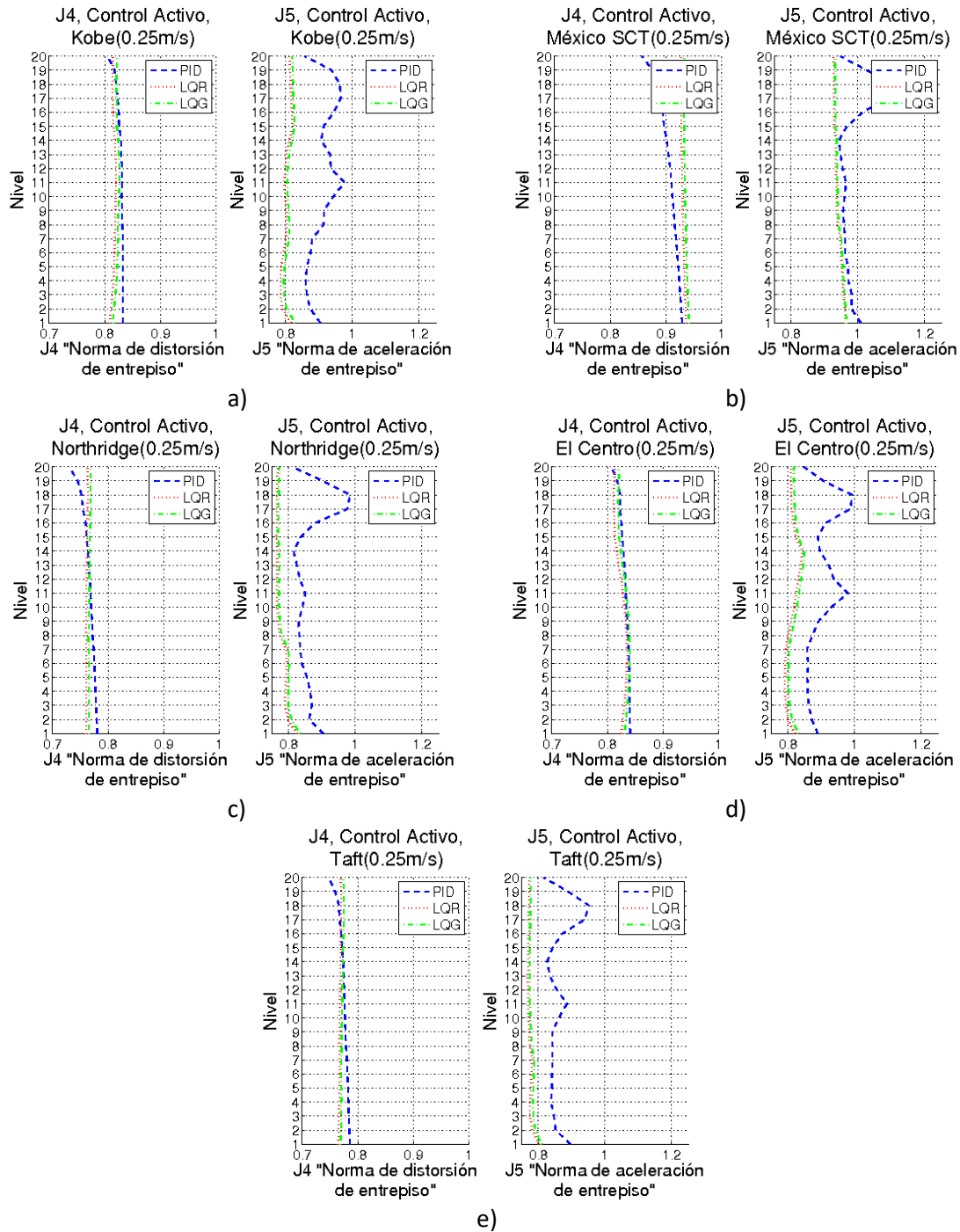


Figura B17.- Gráfica de J4 Y J5 para el marco de 20 niveles en control activo : a) Kobe 0.25m/s, b) México SCT 0.25m/s, c) Northridge 0.25m/s, d) El Centro 0.25m/s y e) Taft 0.25 m/s

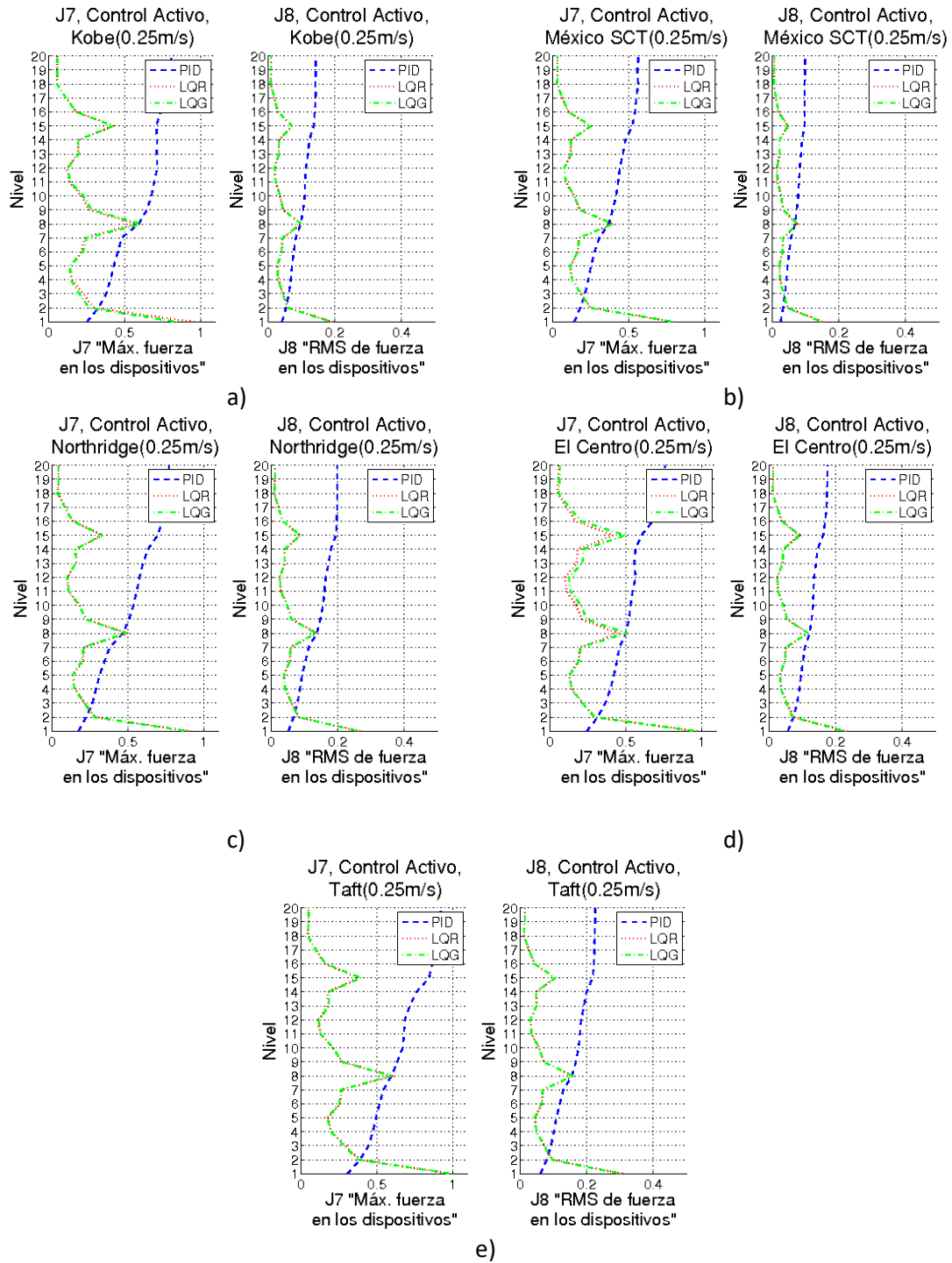


Figura B18.- Gráfica de J7 Y J8 para el marco de 20 niveles en control activo : a) Kobe 0.25m/s, b) México SCT 0.25m/s, c) Northridge 0.25m/s, d) El Centro 0.25m/s y e) Taft 0.25 m/s

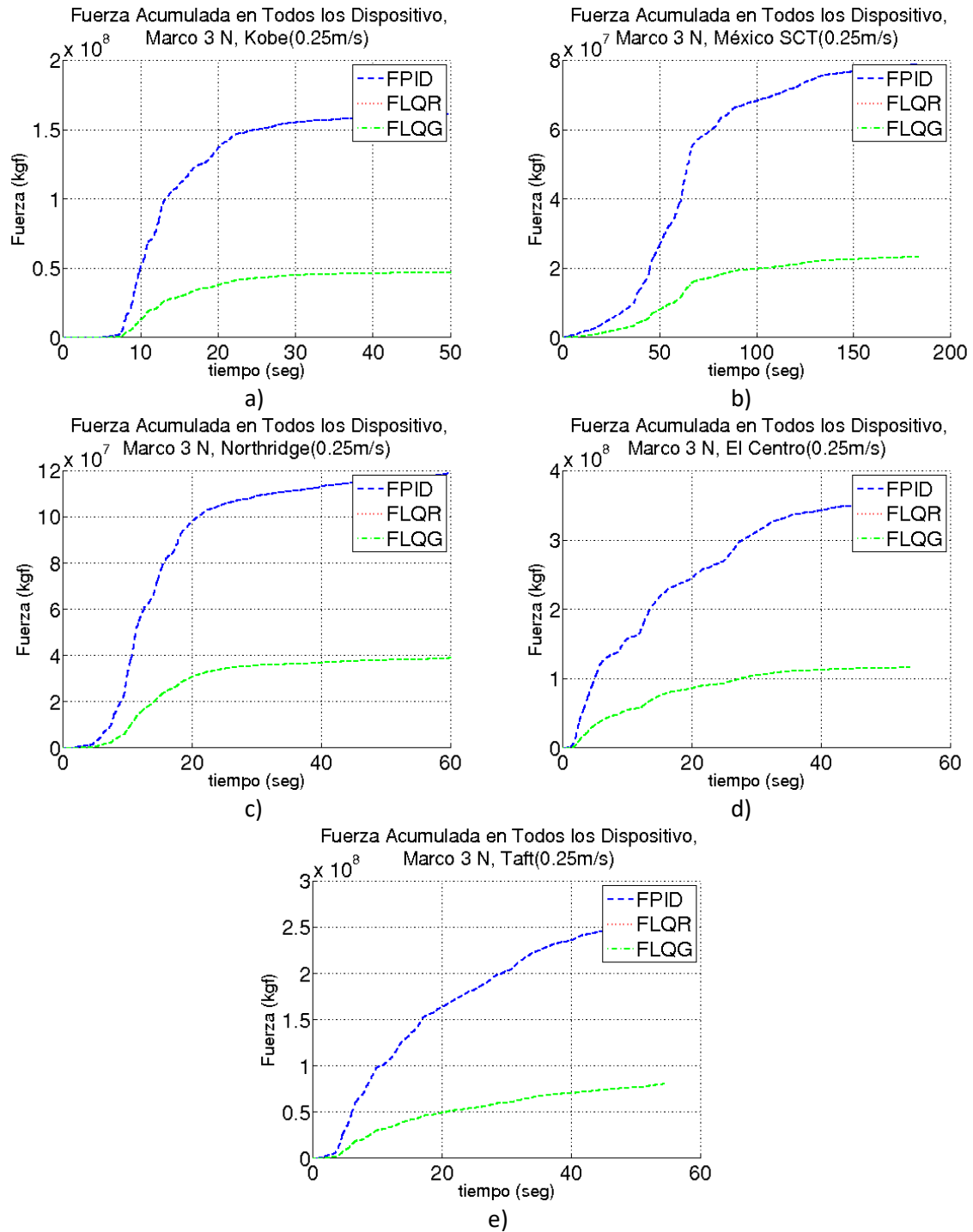


Figura B19 .- Gráfica fuerza acumulada en los 3 dispositivos del marco de 3 niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.25m/s, b) México SCT 0.25m/s, c) Northridge 0.25m/s, d) El Centro 0.25m/s y e) Taft 0.25 m/s

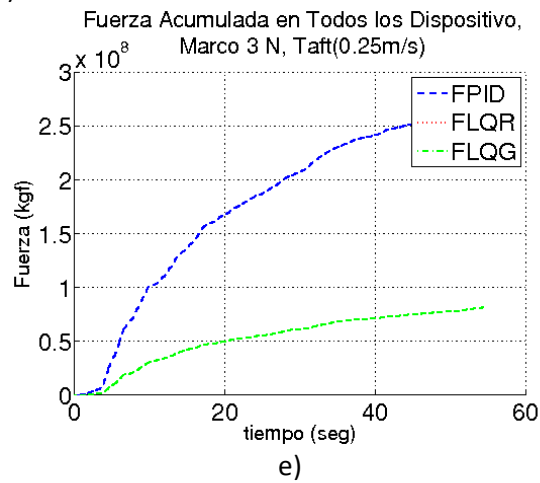
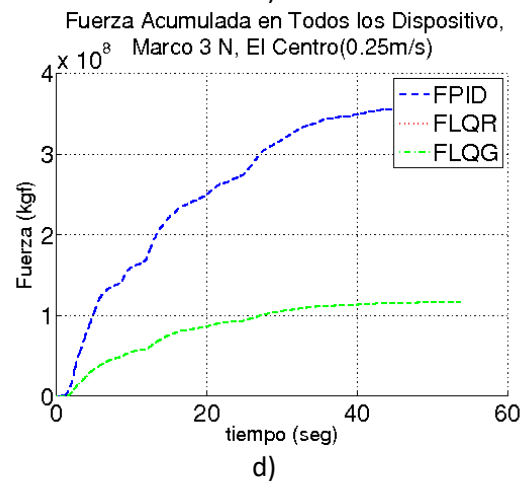
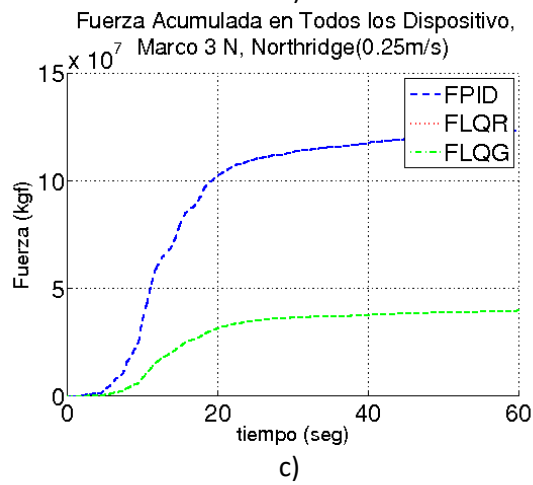
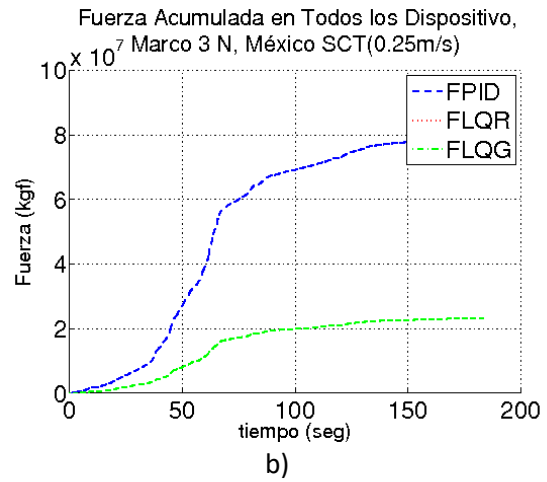
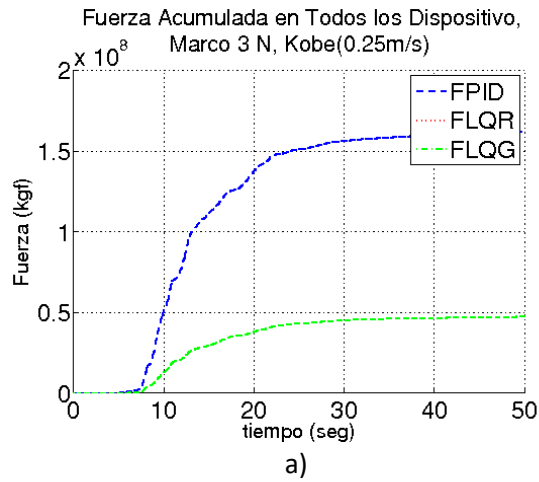


Figura B20.- Gráfica fuerza acumulada en los 3 dispositivos del marco de 3 niveles en control activo : a) Kobe 0.25m/s, b) México SCT 0.25m/s, c) Northridge 0.25m/s, d) El Centro 0.25m/s y e) Taft 0.25 m/s

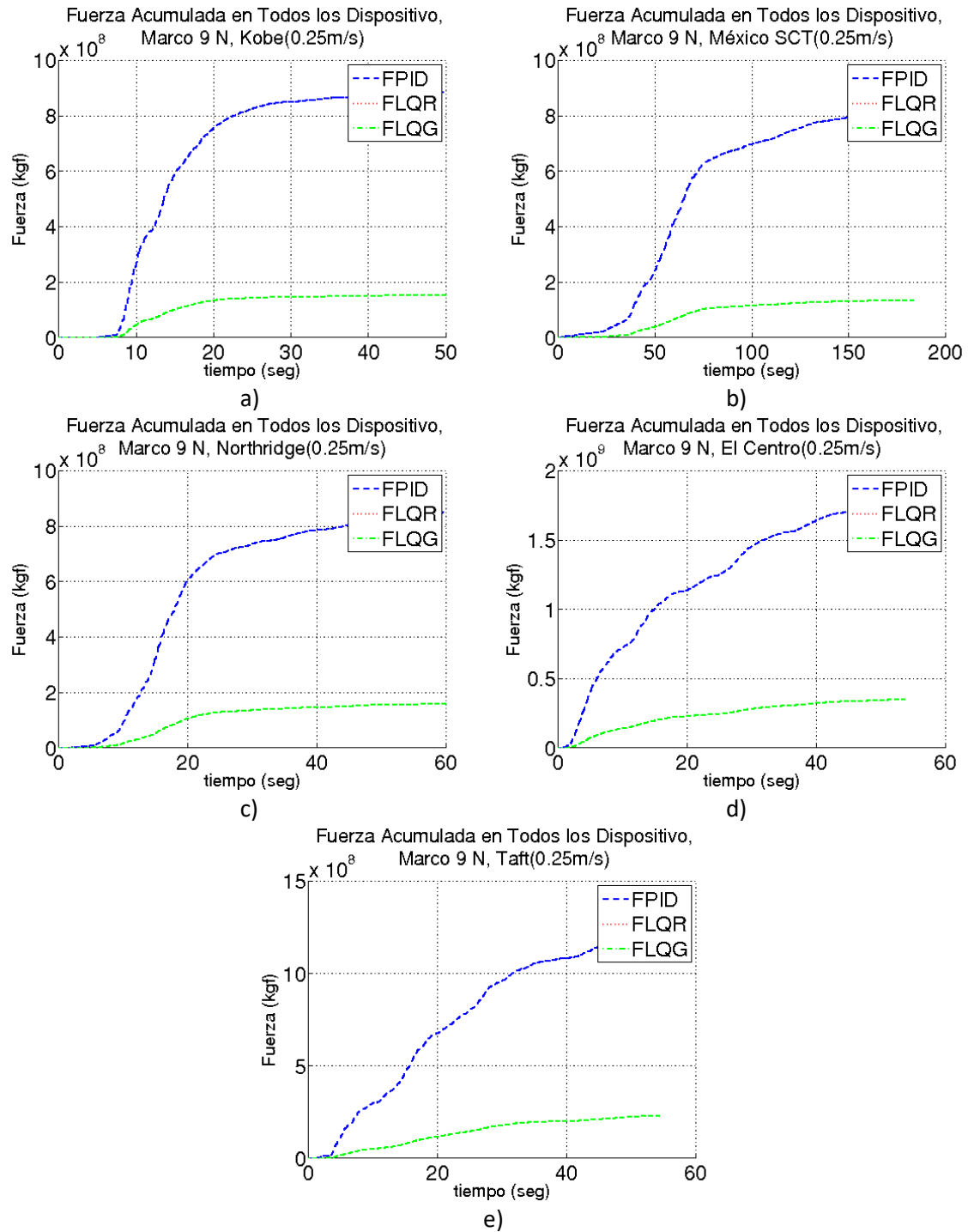


Figura B21.- Gráfica fuerza acumulada en los 9 dispositivos del marco de 9 niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.25m/s, b) México SCT 0.25m/s, c) Northridge 0.25m/s, d) El Centro 0.25m/s y e) Taft 0.25 m/s

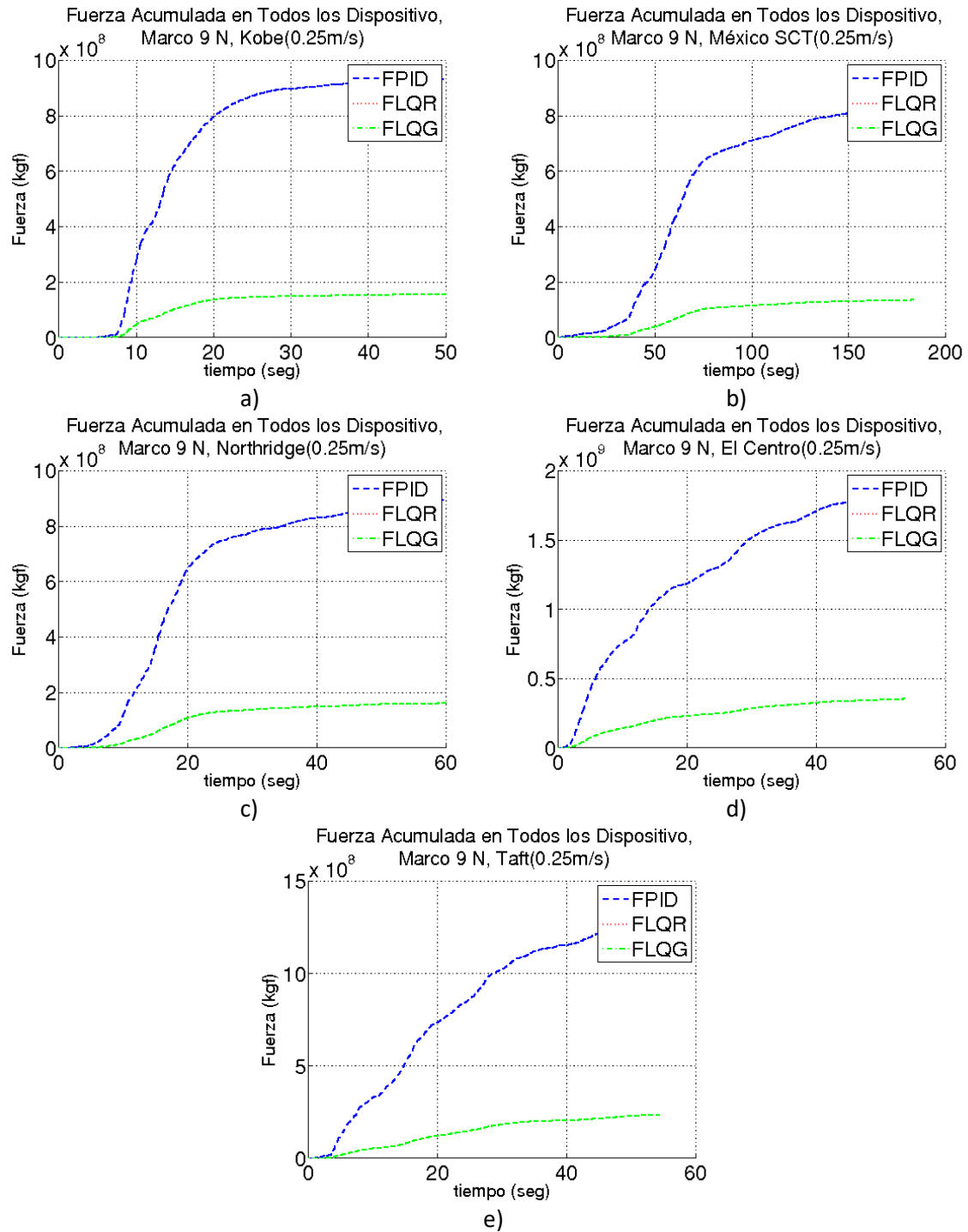


Figura B22.- Gráfica fuerza acumulada en los 9 dispositivos del marco de 9 niveles en control activo : a) Kobe 0.25m/s, b) México SCT 0.25m/s, c) Northridge 0.25m/s, d) El Centro 0.25m/s y e) Taft 0.25 m/s

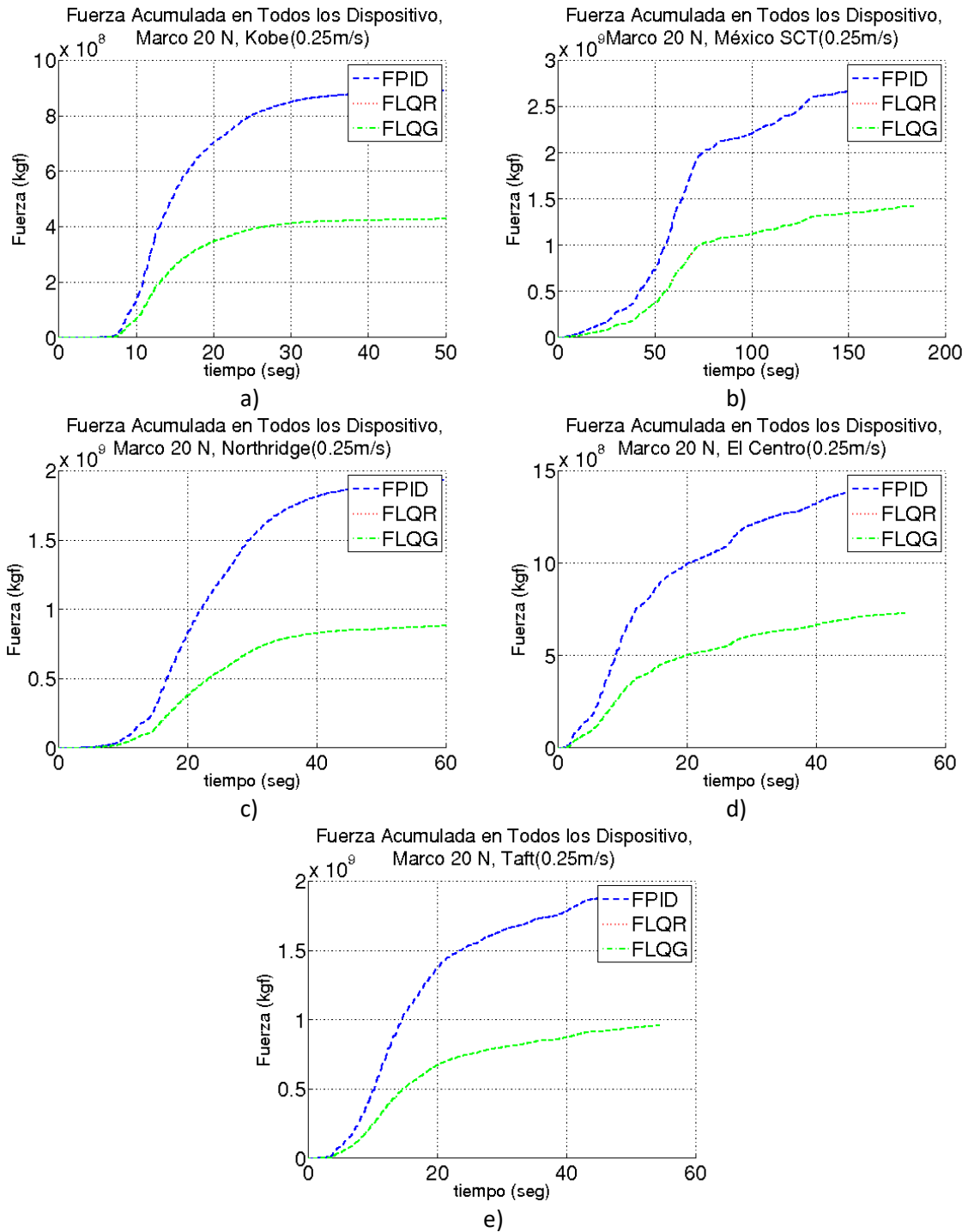


Figura B23.- Gráfica fuerza acumulada en los 20 dispositivos del marco de 20 niveles en control semi-activo : a) Kobe 0.25m/s, b) México SCT 0.25m/s, c) Northridge 0.25m/s, d) El Centro 0.25m/s y e) Taft 0.25 m/s

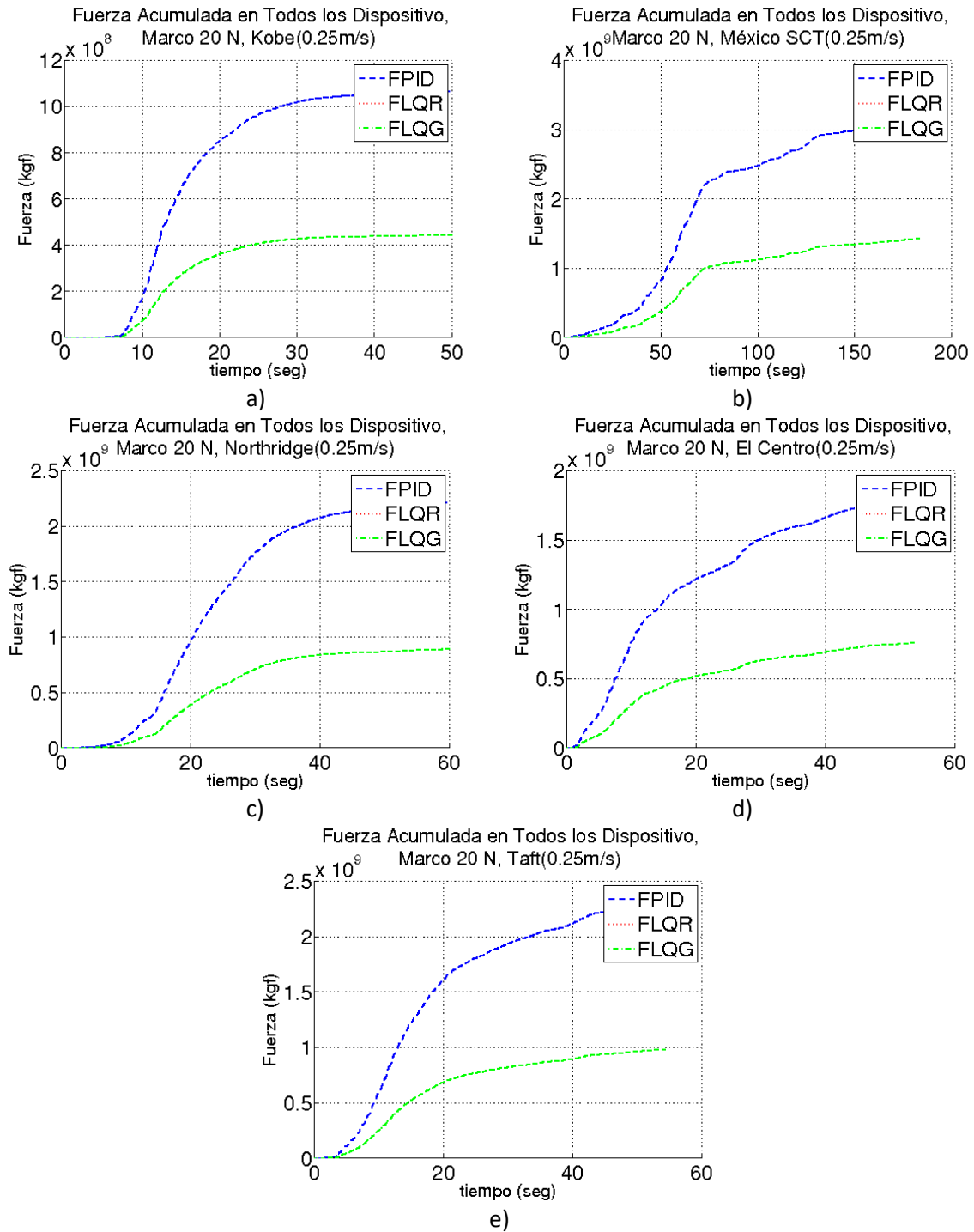


Figura B24.- Gráfica fuerza acumulada en los 20 dispositivos del marco de 20 niveles en control activo : a) Kobe 0.25m/s, b) México SCT 0.25m/s, c) Northridge 0.25m/s, d) El Centro 0.25m/s y e) Taft 0.25 m/s